UEBER METHODEN ZUR ANALYSE VON WACHSTUMSERSCHEINUNGEN.

VON

ERICH NUERNBERGK und H. G. DU BUY.

(Mit Tafel VII und 21 Textfiguren).

Inhaltsübersicht.

1. Einleitung.

Vor kurzem wurden von uns a.O. (H. G. du Buy u. E. Nuernbergk, 1929, I u. II, 1930 [1])) drei Mitteilungen publiziert, in denen wir u.a. einige Untersuchungen über den Einfluss *verschiedenfarbigen Lichtes von variabler Intensität* auf die Wachstumsphysiologie des Avenakeimlinges sowie unsere *Methode der Wachstumsmessung* behandelten. Im Rahmen dieser Veröffentlichungen war es uns s.Z. nicht möglich, die Apparatur genauer zu beschreiben, mit der unsere Resultate erzielt waren. Das soll nun im Folgenden nachgeholt werden, wobei auch die verschiedenen Verbesserungen gehörig berücksichtigt werden, der unsere Versuchseinrichtung im Laufe einer anderthalbjährigen Verwendung in technischer Beziehung unterzogen worden ist.

Die Beschreibung ist absichtlich etwas mehr ins Einzelne gehend abgefasst worden, weil ein Vergleich mit der in Betracht kommenden pflanzenphysiologischen Literatur zeigt, dass sich unsere Methoden vielfach nicht unwesentlich von den Versuchsanstellungen, die andere Autoren gebraucht haben, unterscheiden. Ausserdem glauben wir, dass verschiedene Grundideen, nach denen unsere Apparatur aufgebaut ist und arbeitet, nicht nur mit Erfolg bei der Untersuchung der durch das Licht beeinflussten Wachstumsprozesse benutzt werden können, wie das in unserem speziellen Falle geschieht, sondern auch z.T. bei dem Studium anderer „Lichtreaktionen", wie z.B. Assimilation, Pigmentbildung, Beeinflussung der Samenkeimung

[1]) Vgl. auch E. Nuernbergk (1927), S. 144—148.

durch Licht usw. mit Vorteil angewendet werden können. Als Indikator ihrer Brauchbarkeit fügen wir der eigentlichen Apparaturbeschreibung am Schluss noch eine Mitteilung über einige neue Studien von uns auf dem Gebiet der Reizphysiologie an, die eine Fortsetzung unserer bisher publizierten 3 Arbeiten (l.c.) bilden, und auf die schon hier hingewiesen werden soll. Näheres wird der eine von uns andernorts publizieren.

2. Allgemeine Anordnung des Instrumentariums.

Die gesamte Anordnung der Apparatur ist aus der Photographie Taf. VIII A bzw. teilweise aus den beiden Skizzen Fig. 2 und 3 ersichtlich. Im einzelnen zerfällt das Instrumentarium in 3 Teile, nämlich:

1. Die Vorrichtungen zur Erzeugung weissen oder monochromatischen Lichtes in *variabler Intensität* und dessen Leitung auf die Versuchspflanzen.
2. Die Apparatur zur Messung des Lichtes.
3. Die kinematographische Registrierapparatur, mit der die phototropischen Wachstumserscheinungen gemessen werden.

Fast das ganze Instrumentarium konnte auf *einem* grossen, extra verstärkten Tisch untergebracht werden, was die Handlichkeit erleichtert, da normalerweise bei rotem Dunkelkammerlicht experimentiert wird. Ein grosser Holzthermostat nach Silberschmidt (1928) (Tafel VIII, A, in Fig. 3 nur angedeutet) dient als eigentliche Versuchskammer und unterstützt gleichzeitig die zweckmässige Aufstellung der Beleuchtungseinrichtung und der Lichtmessapparatur.

Der Holzthermostat hat bei einer Höhe von 65—70 cm eine Grundfläche von 70 × 100 cm und kann durch eine herausnehmbare mittlere Wand in 2 gleichgrosse Ab-

schnitte geteilt werden. Die hintere Wand [1]) und die beiden Seitenwände können weggenommen werden (vgl. Taf. VIII, A), während die Vorderwand, die dem Kinoapparat zugekehrt ist, festsitzt und nur eine verschliessbare Oeffnung hat, durch die das Objektiv der Kinokammer durchsieht. Diese steht auf einem Bretterbord, dass seinerseits wieder an der festen Vorderwand des Thermostaten angeschraubt ist. Dadurch bilden Holzthermostat und Aufstellvorrichtung des Kinos ein Ganzes, was wegen der vorhandenen Bodenerschütterungen zweckmässig ist.

Die Heizvorrichtung des Thermostaten ist elektrisch, mit Hilfe von Widerstandsdrähten und Hg-Relais, wie sie Silberschmidt bereits beschrieben hat (vgl. Fig. 8, S. 458). Je nach Wahl des Kontaktthermometers kann mit verschiedenen Temperaturen bei etwa 1/5 Grad Genauigkeit gearbeitet werden, z.Z. ist der Thermostat auf 22° C eingestellt.

Obwohl die Dunkelkammer, in der sich die ganze Apparatur befindet, eine Einrichtung für konstante Feuchtigkeit (max ca 92 %) [2]) und Temperatur hat (Prinzip von F. W. Went 1928), ist es doch ratsam, die Versuche in einem Thermostaten vorzunehmen, dessen Temperatur 2—3° C. höher als die Umgebungstemperatur eingestellt ist. Durch das Arbeiten mit stärkeren Lichtquellen ensteht nämlich nach einiger Zeit eine unvermeidliche, je nach der Grösse des Dunkelzimmers verschieden grosse Erhöhung der Raumtemperatur. Am besten wäre diese durch eine automatische Kühlanlage zu beseitigen, die aber in Utrecht nicht vorhanden ist. Durch die Anwendung

[1]) Diese Wand (in Tafel VIII, A nach der linken Seite zu liegend) kann durch ein grosses Glasfenster ersetst werden, wenn die Bestrahlung grösserer Pflanzen durchgeführt werden soll.

[2]) Schliesst man den Versuchsthermostat gut ab, so kann man in ihm, eventuell unter Zuhilfenahme feuchter Tücher und kleiner Wasserbassins eine noch höhere Feuchtigkeit erzielen. Für den elektrischen und auch optischen Teil der Apparatur, der sich ja grösstenteils ausserhalb des Thermostaten befindet, ist es besser, wenn man die Feuchtigkeit nicht zu hoch treibt, vor allem ist jede Wasserdampfkondensation zu vermeiden, eventuell mit Hilfe des bekannten Mittels, dass man durch Anbringen von ein paar elektrisch geheizten Widerstandsdrähten mit Asbestumwicklung die Apparate lokal etwas über Lufttemperatur erwärmt.

eines etwas höher temperierten Thermostaten werden jedoch auch gut konstante Luftverhältnisse geschaffen und obendrein bekommt man für die Versuchspflanzen einen guten Lichtschutz vor zerstreuter Lichtstrahlung.

2a. Einrichtungen zur Aufzucht der Versuchspflanzen unter konstanten Bedingungen.

Um mit einem unter möglichst gleichmässigen Bedingungen aufgewachsenen Pflanzenmaterial arbeiten zu können, nehmen wir auch die ganze Aufzucht der Versuchspflanzen einschl. ihrer eventuellen Wärmevorbehandlung (Avena!) in dem Versuchsdunkelzimmer vor. Hierfür ist noch ein zweiter Silberschmidtscher Thermostat von gleicher Temperatur wie der Versuchsthermostat, sowie ein kleiner, ebenfalls auf dieselbe Temperatur eingestellter Blechthermostat vorhanden; in diesem letztgenannten findet die Wärmevorbehandlung statt.

Der Holzthermostat hat an seiner Vorderseite oben und unten verschliessbare Luftlöcher, die nicht nur der Ventilation, sondern, vor allem der Regelung der Luftfeuchtigkeit dienen. Sind die Löcher, die mit einem Blendenschutz gegen eindringendes Licht versehen sind, völlig verschlossen, so genügt die Anwesenheit nur einiger Pflanzen in dem Kasten, um dort die Luftfeuchtigkeit gleich auf 95—99 % steigen zu lassen, was nicht allen Pflanzen zuträglich ist. Durch Oeffnen der Löcher kann man aber die Feuchtigkeit bequem so herunterdrücken, dass sie nur 3—5 % über der der umgebenden Luft liegt. Die damit verbundene stärkere Ventilation beeinträchtigt dessen Temperaturkonstanz kaum und ist für die Pflanzen besser.

Der Blechthermostat, in dem die Wärmevorbehandlung der Avena-Keimlinge zur Vermeiden der Mesokotylentwicklung (vgl. H. G. du Buy u. E. Nuernbergk, 1929, I) vorgenommen wird, hat eine so dimensionierte elektrische Heizung, dass in dem Thermostaten 32° C Temperatur erzielt werden können. Es sind 2 Kontaktthermometer vorhanden, eines für 22° C und ein verstellbares für 32° C. Das 32° C Thermometer ist mit einer Schaltuhr und dem 22° C Thermometer so zusammengeschaltet (siehe Schaltskizze, Fig. 8, S. 458), dass es nur so lange die Temperatur auf 32° hält, als die gehende Schaltuhr die Stromzufuhr zu dem 22° Thermometer unterbricht. Sowie aber diese Unterbrechung aufgehoben ist, arbeitet das 22°-

Thermometer, sodass kurze Zeit darauf die Lufttemperatur auf 22° C gesunken ist und dann auf dieser Höhe mit kleinen Schwankungen konstant gehalten wird. Mit Hilfe dieser Einrichtung ist es möglich, die Vorerwärmung der Versuchspflanzen zeitlich genau zu begrenzen und sie überdies auf konstanter Höhe zu halten, auch können wir leicht im Bedarfsfall die Vorerwärmung zu ungewöhnlichen Zeiten vornehmen, da die Schaltuhr (ein speziell abgeänderter gewöhnlicher Wecker) so eingestellt werden kann, dass sie beliebige Zeit nach Ingangsetzen automatisch die Thermostatentemperatur während einer gewünschten Zeitdauer auf 32° erhöht.

Durch diese Automatisierung der Vorbehandlung der Pflanzen ist es möglich, mit einem nur sehr geringe individuelle Unterschiede aufweisenden Pflanzenmaterial zu arbeiten. Fig. 1 möge veranschaulichen, wie ausgezeichnet gerade unsere Pflanzen infolge der Unterdrückung des Mesokotylwachstums aufwachsen: links sieht man ein Töpfchen mit Avena-Keimlingen, die der Wärmevorbehandlung unterzogen worden waren, rechts gleichzeitig gepflanztes, aber nicht vorbehandeltes Material. Vorteilhaft ist es auch, dass sich unsere Pflanzen zu einer bestimmten Zeit stets auf einem genau feststellbaren Punkt der „Grossen Wachstumsperiode" befinden, was bei manchen Wachstumsuntersuchungen notwendig ist.

Ueber die Schaltung der Heizeinrichtung der 3 Thermostaten unterrichtet das Schaltschema, Fig. 8, S. 458.

3. Die Vorrichtungen zur Erzeugung weissen oder monochromatischen Lichtes in variabler Intensität und dessen Heranführung an die Versuchspflanzen.

A. LICHTQUELLEN.

Als Lichtquellen fungieren verschiedene Metallfadenlampen oder eine Quarzquecksilberlampe von Heraeus-Hanau, welche sowohl in wagerechter als auch senkrechter Brennerlage (Gleichstrom 220 V.) gebrannt werden kann.

Die Glühlampen dienen für Versuche mit weissem oder rotem Licht, die Hg-Lampe für Bestrahlungen mit den isolierten Wellenlängen 366, 436, 546 und 578 $\mu\mu$ des Atomspektrums des Hg-Dampfes. Das Molekülspektrum (Bandenspektrum) und das kontinuierliche Spektrum der glühenden Quarzhülle sind im Vergleich zu den eben

genannten Spektrallinien so lichtschwach, dass sie praktisch im kürzerwelligen Spektralbezirk vernachlässigt werden können und höchstens im langwelligen sichtbaren Rot von geringem Einfluss auf die Intensitätsverteilung sind.

Als Glühlampen werden *Kino*-Projektionslampen benutzt, und zwar hauptsächlich 1. Philips 500 W, 110 V, 2. Osram „Kinox" 6 V,

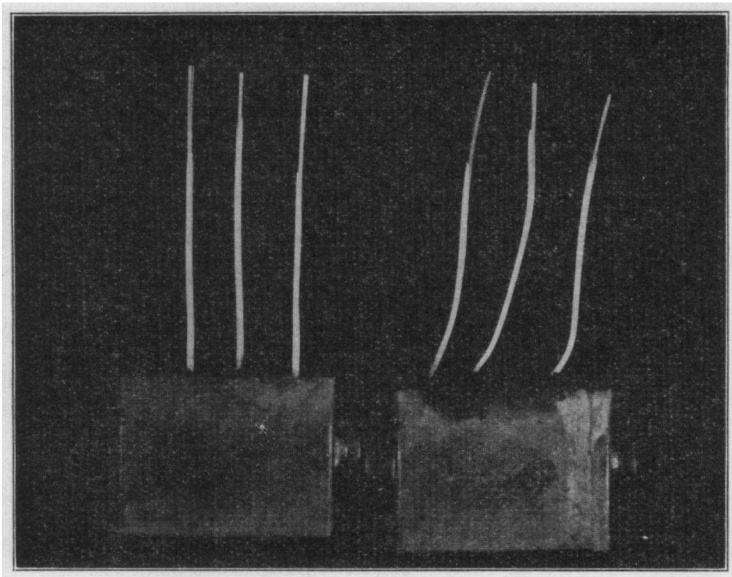


Fig. 1. Einfluss der Wärmevorbehandlung auf die Entwicklung der Avena-Koleoptilen. Links vorbehandelte Keimlinge mit reduziertem Mesokotyl. Rechts *nicht* behandelte Keimpflanzen.

4,35 Amp, 3. Osram 12 V, 8.35 Amp. Alle diese Lampen haben einen kleinen Leuchtkörper und relativ grosse spezifische Leuchtdichte, eignen sich also gut für die Beleuchtung von Linsensystemen. Die eben genannten Niedervoltlampen von 6 und 12 V, die nicht zu teuer sind, kann man, wenn man auf kleinem Raume besonders intensives Licht wünscht, mit etwas Ueberspannung brennen, sie halten das einige Stunden lang aus und kommen dann in ihrer Intensität den kostspieligeren und empfindlicheren Punktlichtlampen fast gleich.

Die Speisung der Lampen erfolgt aus dem städtischen Netz mit

Hilfe von Regulierwiderständen unter Kontrolle der Stromstärke mittels Präzisionsgalvanometers. Ist besonders gleichmässige Lichtintensität erforderlich, so werden in den Lampenstromkreis noch Osram-Eisenwiderstände von 30 V Spannungsabfall zwischengeschaltet, die die Spannungsschwankungen des Netzes kompensieren. Die Schaltung ergibt sich aus Fig. 4, wobei mit „Normallampe" eine Niedervoltlampe gemein ist [1]).

Bei der Aufstellung der Hg-Lampe ist darauf Rücksicht genommen worden, dass das beim Brennen entstehende Ozon gut beseitigt wird. Zu diesem Zwecke ist die Lampe in einen Blechkasten eingeschlossen (Tafel VIII, A, links), der unten mit abgeblendeten Luftlöchern versehen ist und oben ein zu einem Ventilator führendes Rohr (80 mm ø) trägt. Der in einem Kasten befindliche Ventilator gewöhnlicher Konstruktion bläst die Luft in einen in das Freie führenden Luftschacht und wird stets angestellt, sowie die Lampe in Betrieb gesetzt ist. Dadurch ist gute Kühlung der Lampe gewährleistet, was technisch für sie von Vorteil ist (gleichmässige Lichtintensität und Möglichkeit, die Lampe ohne Nachteile höher zu belasten). Die Konstruktion des Ventilationsrohres ist so beschaffen, dass sich die Lampe um einige 50 cm von ihrem Standort verschieben lässt. Die Schaltung der Lampe und die Kontrolle des ihr zugeführten Stromes ist aus Fig. 4 ersichtlich.

Da die für die Regulierung der Lampen, besonders der Niedervoltlampen erforderlichen Widerstände sehr grosse Wärme erzeugen, so sind sie derart unterteilt worden, dass sich im Versuchszimmer nur die für die *Feinregulierung* notwendigen Widerstände befinden. (Fig. 4, I), während diejenigen Widerstände, die zur Spannungsvernichtung oder als Beruhigungswiderstände (bei der Hg-Lampe) dienen, und die die meiste Wärme ausstrahlen, ausserhalb des Dunkelzimmers angebracht worden sind. Für diese Art Widerstände sind die sog. Heizsonnenpatronen besonders brauchbar, ausserdem auch billiger in der Anschaffung als normale Gleitwiderstände.

---

[1]) Ueber die Energiekurve dieser Lampen siehe im folgenden S. 463, 464.

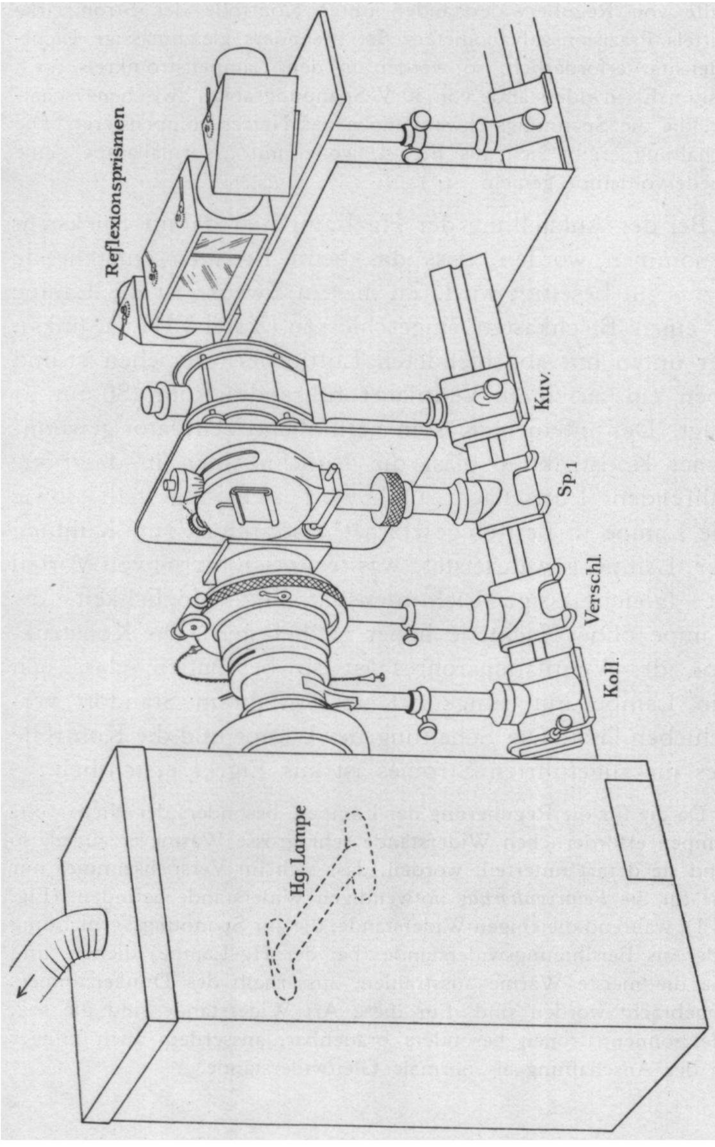


Fig. 2. Linke Hälfte der Beleuchtungsapparatur. Erklärungen im Text.

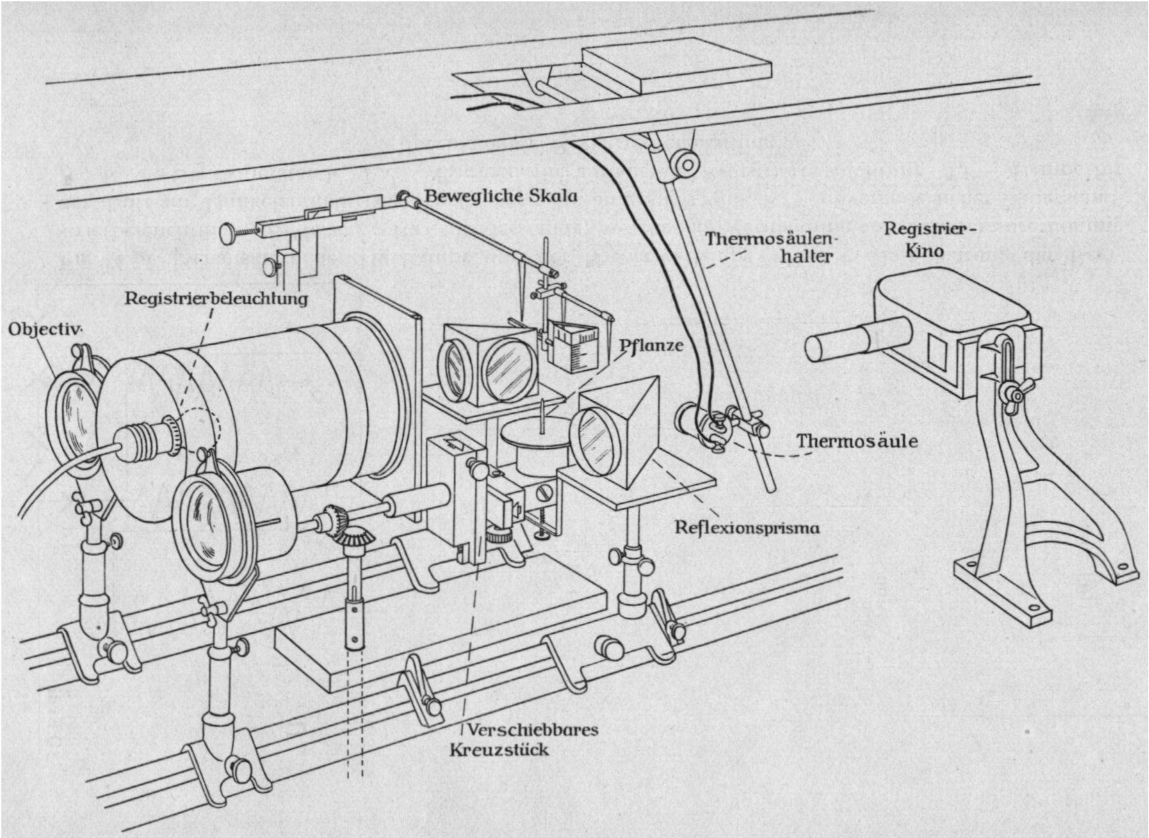


Fig. 3. Rechte Hälfte der Beleuchtungsapparatur. Erklärungen im Text.

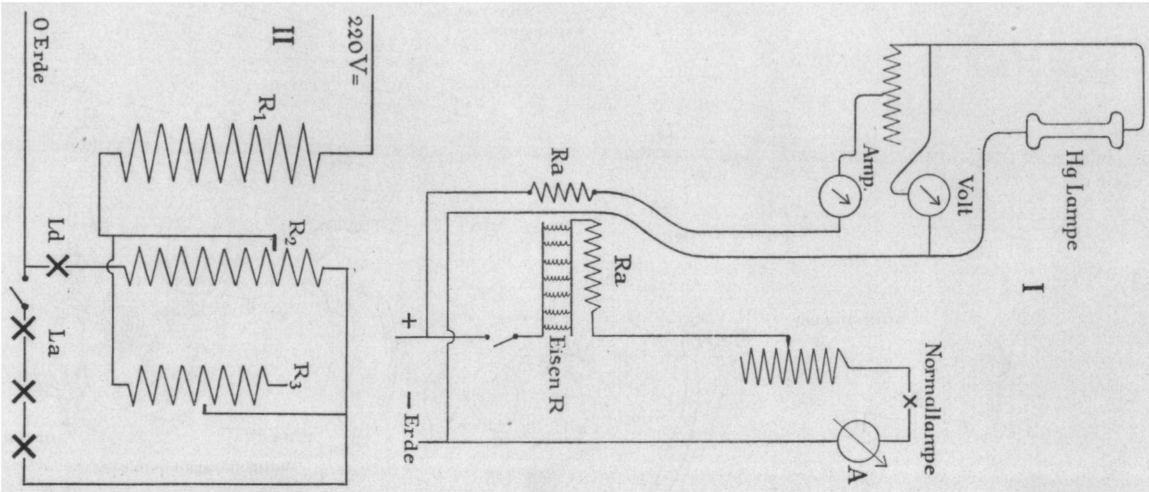


Fig. 4. I. Schaltskizze der Hg-Lampe und der Niedervoltlampe. Fig. 4, II. Schaltung der Registrierbeleuchtung. *Erklärung:* Ra = Widerstände, welche zur Vermeidung von Temperaturerhöhung der Luft im Dunkelzimmer ausserhalb von ihm aufgestellt sind. R_1 = unveränderlicher Widerstand. R_2, R_3 = Gleitwiderstände. La = Lampen für auffallende Registrierbeleuchtung. Id = Lampe für durchfallende Registrierbeleuchtung.

B. DIE FÜR DIE BELEUCHTUNG DER VERSUCHSPFLANZEN DIENENDEN EINRICHTUNGEN.

Für phototropische Versuche ist es häufig nötig, exakt definierte Beleuchtungsbedingungen zu schaffen. Demzufolge ist die von uns getroffene Anordnung so gemacht worden, dass man praktisch fast jeden beliebigen Beleuchtungsmodus der Experimentierpflanze erzielen kann.

Betrachten wir Fig. 2, so sehen wir, dass das Licht bei Austritt aus dem Lampengehäuse zuerst einen Zeiss-Kollektor (f = 8,5 cm, Linsen ø = 6 cm) und einen grossen Compoundverschluss (Grösse 5) passiert, sodann auf einen Spalt trifft, hinter dem sich eine Zeisssche Porzellanküvette befindet, und schliesslich ein aus 6 Reflexionsprismen und 2 symmetrischen photographischen Objektiven bestehendes „Lichtverteilungssystem" durchlaufen muss, ehe es auf das Versuchsobjekt, etwa eine Avena-Koleoptile trifft (vgl. Fig. 3). Hinter den Spalt kann auch ein geradsichtiger Monochromator gesetzt werden, und in diesem Falle entspricht die Anordnung der schematischen Zeichnung Fig. 5, I. Bis auf den Monochromator sind dabei alle optischen Teile auf 3 in der Höhe verstellbaren optischen Bänken verschiebbar angebracht, wodurch die Justierung der Lichtstrahlen erleichtert wird. Fokussiert wird das Bild der Lichtquelle in der Regel zunächst mittels des Kollektors auf den Spalt 1 (Fig. 2). Dieser, von Winkel-Zeiss, Göttingen hergestellte Präzisionsspalt hat 2 rechtwinklig zueinander gestellte, symmetrisch verschiebbare Spaltbackenpaare, welche überdies in einem Winkel von 90 Grad verstellt werden können. Ferner ist der ganze Spalt rechtwinklig seitlich und in der Höhe mittels Spindel und Trieb verstellbar. Seine maximale Oeffnungsweite beträgt ca 12 mm × 12 mm.

Das quasi selbstleuchtende Spaltbild wird dann nach Teilung durch 4 Reflexionsprismen (Fig. 2 und 5, I) mittels zweier Trioplane (1 : 3, f = 16,5 cm) von Hugo Meyer,

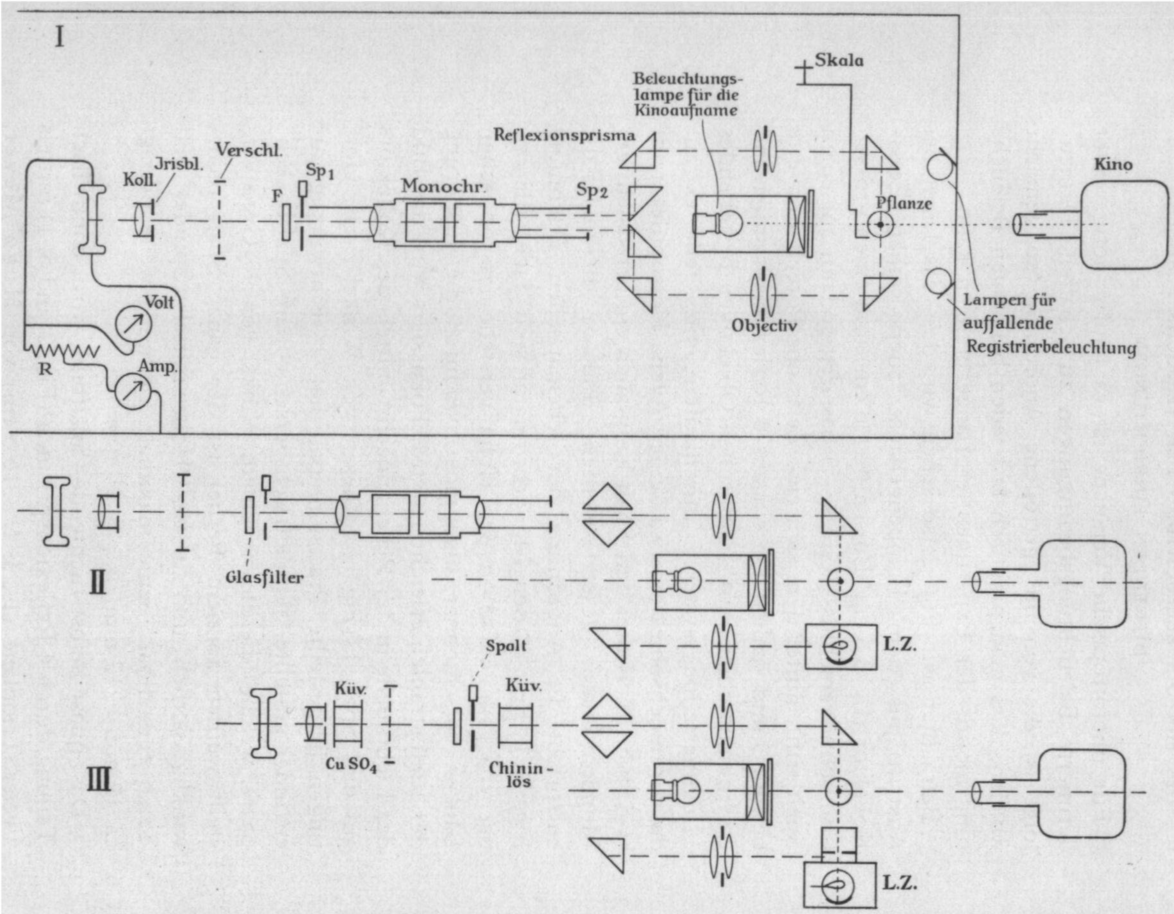


Fig. 5. Schema der verschiedenen möglichen Anordnungen des optischen Teiles der Beleuchtungsapparatur. Erklärungen im Text.

Görlitz antagonistisch auf die Versuchspflanze projiziert (Fig. 3 und 5, I), wibei es nochmals 2 Reflexionsprismen passiert.

Diese Projektionsmethode ermöglicht eine exakte Zonenbelichtung, wie sie bei phototropischen Untersuchungen oft gebraucht wird. Dabei sind optisch einwandfreie Objektive nötig, ebenso Reflexionsprismen und nicht etwa gewöhnliche Glasspiegel, da sich anders keine *exakten* Spaltprojektionen erzielen lassen. [1]).

Die Reflexionsprismen von ca 51 mm Kantenlänge stammen von Ziess-Ikon, Dresden, sie sind von J. Möller, Wedel (Holstein) nachpoliert, worauf sie exakt justierbar (vgl. Fig. 2) in kleine Gehäuse eingebaut worden sind.

Soll eine Beleuchtung von oben auf einer grösseren Fläche erzielt werden, so wird ein normaler Epidiaskopspiegel von Zeiss benutzt.

Die eben beschriebene optische Anordnung (Fig. 5, I) dient für antagonistische Beleuchtung, wobei das Spaltbild von dem einen Reflexionsprismensatz (Fig. 2, Mitte) halbiert wird. Soll mit einseitiger Beleuchtung gearbeitet werden, so kann man auch die Anordnungen anwenden, wie sie Fig. 5, II und III zeigt. In diesen Fällen wird die eine, an das Lampengehäuse anschliessende optische Bank etwas verschoben, wie es dem Zustande in der Taf. VIII, A entspricht (übereinstimmend mit Fig. 5, III). Man hat dadurch den Vorteil, grössere Intensitäten auf die Pflanze projizieren zu können, da das Spaltbild nicht halbiert wird, und infolge der Verwendung nur eines Reflexionsprismas weniger Lichtverlust durch Reflexion vorhanden ist.

Nimmt man den Spalt 1. weg, so können auch grössere Flächen gleichmässig beleuchtet werden, wie überhaupt die ganze Anordnung die *grösstmögliche Variation* in dem Belichtungsmodus der Versuchsobjekte zulässt.

Bemerkt sei noch, dass derjenige Teil der optischen Anordnung, der in Fig. 3 abgebildet ist, in der einen Hälfte des Versuchsthermo-

---

[1]) Ueber die, als Hilfsmittel dabei verwendete „Bewegliche Skala" vgl. im folgenden S. 474.

staten, der sog. Versuchskammer untergebracht ist, während alles Uebrige in der anderen Hälfte, bzw. ausserhalb des Thermostaten steht. Dabei befindet sich die unterteilende Wand (S. 420) unmittelbar hinter den Prismen (Tafel VIII, A); durch 2 mit Verschluss und vertauschbaren Blenden versehene Oeffnungen wird das Licht auf die Objektive bzw. Prismen der Fig. 3 geworfen. Dadurch sind die Versuchspflanzen *völlig* vor Streuungslicht geschützt, wozu auch noch die üblichen Lichtabschirmungsbleche am Lampengehäuse, Kollektor, Compoundverschluss und Spalt 1. beitragen.

C. DIE EINRICHTUNGEN ZUR ERZEUGUNG VON MONOCHROMATISCHEM LICHT.

I. *Der Monochromator.*

Zur Erzielung von monochromatischem Licht sind 2 Hilfsmittel vorhanden, ein geradsichtiger Monochromator von Winkel-Zeiss, Göttingen, wie er zur Beleuchtung von Polarisationsapparaten gebraucht wird, und Schottsche Farbgläser und Flüssigkeitsfilter.

Der Monochromator mit einer Prismenanordnung nach Wadsworth und einem Oeffnungsverhältnis der beiden Kollimatorlinsen von 1 : 5 ist relativ lichtstark, aber trotzdem für manche physiologische Versuche noch nicht lichtstark genug. [1]) Ueber diesen Nachteil aller Monochromatoren klagen auch O. Warburg und E. Negelein (1928), die einen, vielleicht noch geeigneteren Monochromator mit Young'scher Prismenanordnung von Dr. C. Leiss, Berlin-Steglitz verwenden.

Am zweckmässigsten sind Monochromatoren bei physiologischen Versuchen mit *Kohlebogenlampen* als Lichtquellen zu verwenden, weil diese die für eine günstige Ausnutzung der Optik des Monochromators notwendige hohe spezifische Lichtintensität besitzen, jedoch hat man den Nachteil, dass infolge des notwendigen Kohlenwechsels nur kurz dauernde Strahlungsversuche vorgenommen werden können. Arbeitet man mit niedervoltigen Glühlampen, so erhält man nur in

[1]) Der Monochromator lässt sich auch als Spektroskop verwenden, wobei der Austrittsspalt durch ein Okular mit Fadenkreuz ersetzt wird.

den längerwelligen Spektralbezirken einigermassen intensives Licht (vgl. dazu O. Warburg u. E. Negelein, 1928). Kommt es dabei nicht darauf an, sehr enge Spektralbezirke zu erhalten, so kann man zweckmässig mit Warburg u. Negelein (l.c.) den Eintrittsspalt des Monochromators durch den Glühlampenfaden selbst ersetzen, wobei eine Nitralampe mit einer einzigen *geraden* Wolframspirale oder (bei Wechselstrom) eine Wolframbandlampe verwendet werden muss. Bei den von uns benutzen kleinen Nitralampen von Osram oder Philips (S. 424) ist diese Methode gut brauchbar, weil sich der Leuchtdraht nur 8—10 mm von der Oberfläche des Glasballons entfernt befindet. In solchen Fällen entfernt man den Eintrittsspalt ganz, oder man schiebt die Glühlampe unmittelbar an den weit geöffneten Spalt heran und erspart somit die Lichtverluste, die durch eine vorgeschaltete Kondensorlinse entstehen würden.

Benutzt man die stärker belastete Hg-Lampe als Lichtquelle, so bekommt man ziemlich helles Licht in den Wellenlängen 578, 546, und 436$\mu\mu$, aber noch praktischer arbeitet man dann mit Farbfiltern, zumal wenn man aus experimentellen Gründen in der Variation der Optik (Verschiebbarkeit intensiver Spaltbilder etc.) grosse Bewegungsfreiheit gebraucht. Wir ziehen daher die Anwendung von Farbfiltern dem Gebrauch des Monochromators nach Möglichkeit vor.

II. *Die Glas- und Flüssigkeitsfilter.*

Ueber Farbfilter ist kürzlich eine Untersuchung von Fr. Bachmann (1929) und J. Plotnikow (1930) erschienen, auf die wir hier verweisen möchten. Ferner sei darauf aufmerksam gemacht, dass von F. Weigert und H. Staude (1927), bzw. E. Elvegård, H. Staude u. F. Weigert (1929) eine neue Art von Lichtfiltern, die sog. „Christiansenfilter" ausgearbeitet worden sind, die auf dem Prinzip der von Christiansen 1884/1885 aufgefundenen „Monochrome" beruht. Für uns lag bisher keine Notwendigkeit vor, uns dieser zuletzt genannten Methode, enge Spektralbezirke lichtstark auszublenden, zu bedienen, sodass wir hier nicht näher darauf einzugehen brauchen. Wir hoffen jedoch, anderen Ortes darauf zurückkommen zu können.

Da die von uns angewandten Farbfilterkombinationen

z.T. von den von Bachmann (l.c.) und Plotnikow (l.c.) beschriebenen Filtern abweichen, sei im folgenden eine kurze Beschreibung von ihnen gegeben. Sie dienen hauptsächlich zur *Isolierung der Wellenlängen* λ = *366, 436, 546 und 578* $\mu\mu$ *der Hg-Lampe* und bestehen bis auf ein $CuSO_4$-Filter und ein Chinin-Filter nur aus verschiedenen *Schottschen Farbgläsern,* die wir der Liste 4213/4526 von Schott & Gen., Jena, entnommen haben. Wir ziehen diese Art von Filtern allen Gelatine- und Flüssigkeitsfiltern vor, da sie praktisch *unveränderlich* sind, leicht in gleicher Qualität nachbezogen werden können, und von der Firma *spektralphotometrisch* nachgeprüft sind. Die nachher gegebenen Tabellen und Kurven der Duchlässigkeitswerte der einzelnen Filterkombinationen haben wir aus den, jedem Farbglas von Schott & Gen. extra beigegebenen Durchlässigkeitszahlen, die von der Firma mit einer Genauigkeit von $\pm$ 2 % garantiert werden, *berechnet.* Dabei sind aber die *Reflexionsverluste nicht* mit in Rechnung gezogen, da sie verschieden hoch ausfallen, je nachdem man die einzelnen Kombinationen verkittet oder getrennt verwendet. Nach der Liste 4213 von Schott muss man, wenn 2 spiegelnde Flächen vorhanden sind, also 1 Glas, die angegebenen D-Werte (Durchlässigkeits-) mit 0,905—0,925 multiplizieren (bei den einzelnen Farbgläsern etwas verschieden), wenn man die Reflexionsverluste berücksichtigen will.

Da diese Reflexionsverluste bei dem Hintereinanderschalten mehrerer Filter ziemlich beträchtliche Werte erreichen und die Intensität des gefilterten Lichts unnötig schwächen, empfiehlt es sich nach Fr. Weigert (1927, S. 161), alle Filter einschl. der Küvetten für $CuSO_4$ oder Chinin in einer grösseren Küvette, die mit Wasser gefüllt ist, unterzubringen. Dadurch werden die Reflexionsverluste von etwa 9—10 % pro Einzelfilter auf ca 1 % für 2 spiegelnde Grenzflächen herabgesetzt, ausserdem ist damit eine verbesserte Absorption des Ultrarot verbunden.

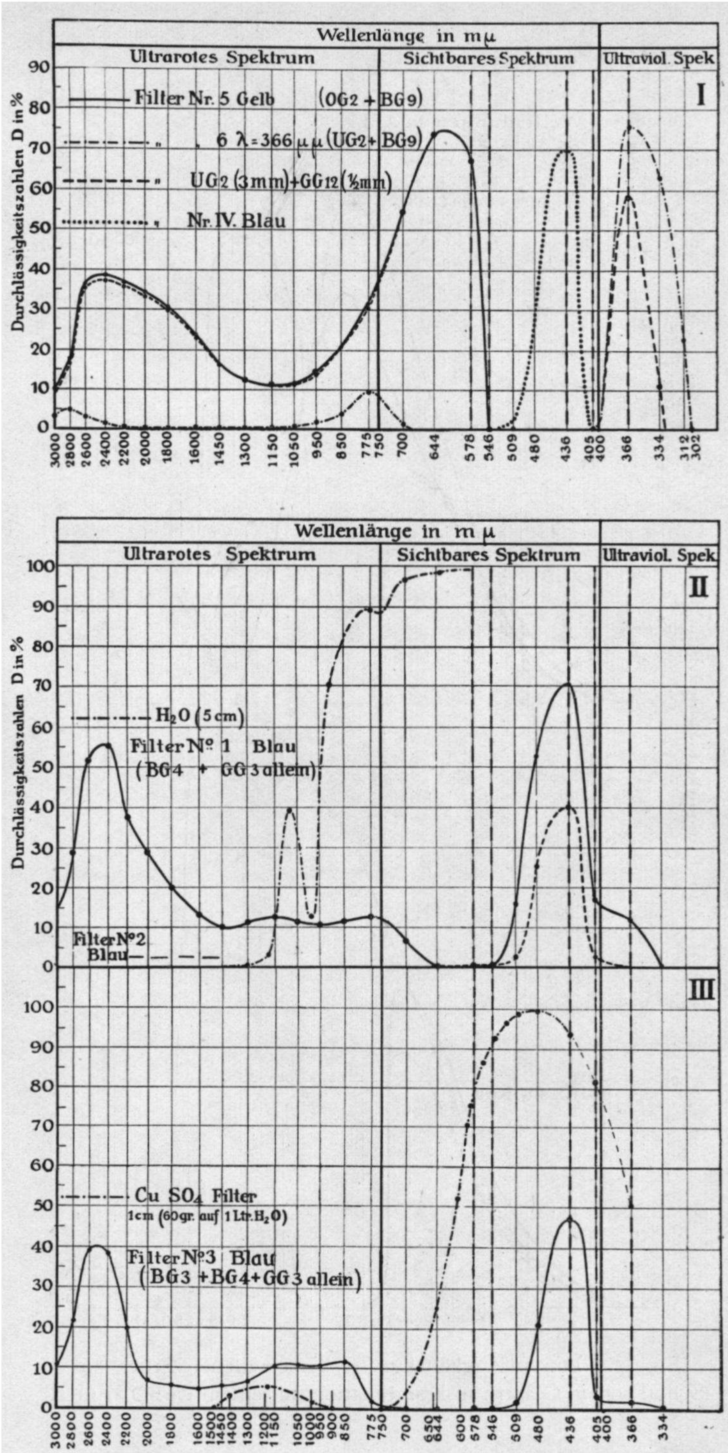


Fig. 6. Durchlässigkeitskurven verschiedener Flüssigkeitsfilter und Filter aus Schott'schen Gläsern.

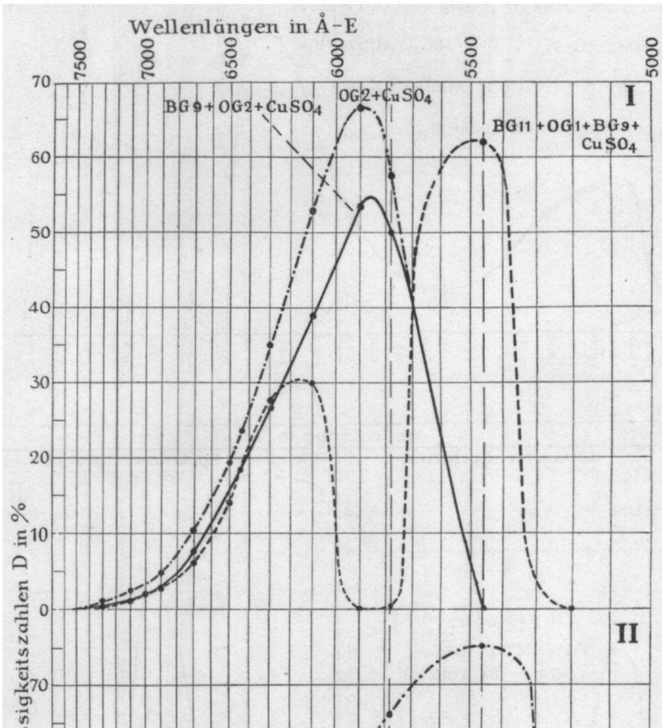


Fig. 7. Durchlässigkeitskurven verschiedener Filter aus Schott'schen Gläsern in Kombination mit einem $CuSO_4$-Filter.

Bemerkt sei, dass in den folgenden Tabellen die D-Werte der Wellenlängen, die dem optischen Schwerpunkt der Filter am nächsten kommen bzw. ihm entsprechen, *unterstrichen* sind.

Absorption des Ultrarot. Fig. 6, III und Tab. 1.

Hierzu und zur Absorption des langwelligen sichtbaren Rot dient ein dauerhaftes Flüssigkeitsfilter von 6g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ in 100 ccm Wasser, das mit der *vierfachen Menge Wasser* bis auf ein Volumen von 500 ccm verdünnt wird und sich in einer *Schichtdicke von 5 cm* in einer Porzellanküvette von Zeiss-Jena befindet. Diese Verdünnung der ursprünglichen Filterlösung erfolgt entsprechend dem Beerschen Gesetz, um bei 5 cm Schichtdicke das Absorptions-

Tab. 1.

D-Werte einer 6 % $CuSO_4$-Lösung in Wasser. (Z. T. nach F. Bachmann, 1929 und O. Warburg u. E. Negelein, 1928, S. 465.)

Schichtdicke = 1 cm.

Wellenlänge in $\mu\mu$	D	Wellenlänge in $\mu\mu$	D
730	0,01	590	0,704
710	0,022	578	0,78
690	0,049	546	0,907
670	0,104	509	0,98
650	0,194	480	0,995
630	0,357	436	0,935 [1]
610	0,525	405	0,815 [1]
		366	0,50 [1]

[1]) Eigene Messungen mit Photozelle, Monochromator oder Filtern, und Küvetten verschiedener Schichtdicke!

vermögen einer 1 cm dicken, *6* % $CuSO_4$-Lösung zu haben, für welche die D-Werte genauer bekannt sind. Das Filter wird fast bei allen Kombinationen benutzt.

Wie die Tabelle zeigt, wird das langwellige Rot erheblich von der $CuSO_4$-Lösung absorbiert. Will man daher mit Licht von längerer Wellenlänge arbeiten, so muss man als Wärmefilter gewöhnliches Wasser nehmen, das aber den Nachteil hat, Ultrarot bis ca 950 $\mu\mu$ gut durchzulassen (Fig. 6, II [1]). Bislang kennt man kein gutes Wärmestrahlenfilter, das genau das ultrarote Spektrum vom sichtbaren Spektrum trennt.

Auch das $CuSO_4$-Filter hat zwischen 900 und 1500 $\mu\mu$ eine geringe Durchlässigkeit (vgl. Fig. 6, III), welche im Hinblick auf die später noch zu besprechenden (S. 453) thermoelektrischen Messungen der Energie nach Möglichkeit zu beseitigen ist. Hierzu dient uns das Schott-Filter BG9 (2 mm Dicke), das gerade zwischen 900 und 1500 $\mu\mu$ eine grosse Absorption aufweist (vgl. Fig. 6, I, wo die Absorptionskurve des Filters Nr. 5 (OG2 + BG9) im Ultrarot hauptsächlich durch BG9 bedingt ist) und daher das $CuSO_4$-Filter vorzüglich ergänzt [2]), sodass nunmehr die *maximale* Durchlässigkeit für den Bezirk 900—1500 $\mu\mu$ nicht mehr als ½ % beträgt.

Farbfilter für Rot. RG1 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + BG9 (2 mm). Fig. 7, II und Tab. 2.

Als Rotfilter dient das Schottglas RG1 (2 mm) in Verbindung mit $CuSO_4$ + BG9. Der optische Schwerpunkt der Kombination liegt bei etwa 610 $\mu\mu$. Das Filter liefert also ein helles Rot und ist nicht sehr transparent. Will man grössere Transparenz haben, so kann man BG9

[1]) Entnommen dem Handb. d. Physik, Bd. 19 (1928), S. 430, Abb. 17 und den bei Bachmann zitierten Tabellen von Aschkinass.

[2]) Man ersetzt zur Vermeidung von Reflexionsverlusten eine Glasscheibe der $CuSO_4$-Küvette durch das rund geschliffene Filterglas BG9.

Für $\lambda = 436$ $\mu\mu$ hat BG (2 mm) eine Durchlässigkeit von 0,883 (ohne Reflexionsverluste, vgl. S. 461, Anm.).

weglassen (vgl. Fig. 7, II) und eventuell das $CuSO_4$ durch Wasser ersetzen, hat aber dann den Nachteil, dass mehr Ultrarot durchgelassen wird. Ultraviolett wird völlig absorbiert.

Tab. 2.

D-Werte des Filters RG1 in zweierlei Kombination für einige Wellenlängen.

Wellenlänge in $\mu\mu$	D für RG1 + $CuSO_4$ (2 mm) 6 % (1 cm)	D für RG1 + $CuSO_4$ + BG9 (2 mm) 6 % (1 cm) (2 mm)
730	0,0096	0,004
710	0,021	0,01
700		0,0235
690	0,047	0,027
670	0,1	0,06
650	0,18	0,125
644	0,204	0,15
630	0,32	0,24
620	0,38	0,30
610	*0,42*	*0,34*
590	.... [1])	.... [1])

Will man mit *langwelligem* roten Licht arbeiten, so ist es praktischer, einen Monochromator oder ein „Christiansenfilter" (Elvegård, Staude u. Weigert, (1929) bzw. Weigert u. Staude (1927)) zu nutzen, da es sonst zu schwierig ist, das Ultrarot zu eliminieren.

Farbfilter für Gelb ($\lambda = 578\,\mu\mu$). OG2 (2 mm) [2]) + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm). Fig. 6, I, 7, I und Tab. 3.

Das Filter OG2 (2 mm) gebrauchen wir zur Isolierung von $\lambda = 578\,\mu\mu$ der Hg-Lampe. In Verbindung mit $CuSO_4$ und BG9 ist es dafür sehr geeignet, da das an und für sich schwache Rot der Hg-Lampe zwischen 600 und 700 $\mu\mu$

[1]) Nicht messbar!

[2]) Für $\lambda = 578\mu\mu$ hat OG2 (2 mm) einschl. Reflexionsverluste eine D-Wert von 0,674 (vgl. S. 461, Anm.).

noch weiterhin kräftig geschwächt wird (siehe weiter unten). Die Durchlässigkeit beträgt für $\lambda = 578\ \mu\mu$ immerhin noch 50 %. Lässt man BG9 oder $CuSO_4$ weg, so wird die *absolute* Transparenz für $\lambda = 578\ \mu\mu$ zwar gesteigert, die *relative* Transparenz gegenüber den anderen, noch durchgelassenen Spektralbezirken aber verringert, sodass das Filter nicht mehr so monochromatisch ist, besonders im Bereich von 600—700 $\mu\mu$ (vgl. Fig. 7, I, die beiden Kurven mit und ohne BG9, sowie die Kurve Fig. 6, I, wo $CuSO_4$ fehlt.). Ultraviolett wird völlig absorbiert.

Tab. 3.

Durchlässigkeit des Filters OG2 (2 mm) + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm).

Wellenlänge in $\mu\mu$	$D = I/I_0$ [1]	$d = i_{\lambda x}/i_{\lambda = 578\mu\mu}$ [2]
546	0,00	0,0
578	*0,50*	*1*
590	0,53	1,06
610	0,39	0,78
630	0,27	0,54
644	0,18	0,36
650	0,14	0,28
670	0,07	0,14
690	0,03	0,06
700	0,02	0,04
710	0,01	0,02
730	0,005	0,01

Zur genaueren Prüfung des Filters auf seine Rotdurchlässigkeit hin, wenn die *Hg-Lampe als Lichtquelle* benutzt wird, wurde nach

[1]) I = vom Filter durchgelassenes Licht, I_0 = auf das Filter auffallende Licht.

[2]) Entspricht der oben erwähnten "relativen Transparenz".

dem Prinzip von O. Warburg und E. Negelein (1928) die Energie thermoelektrisch gemessen, wenn
1. die eigentliche Filterkombination
2. „ „ „ + Filter RG1 (2 mm)
in den Strahlengang eingeschaltet waren. Bei 2 wird durch das Rotfilter $\lambda = 578 \mu\mu$ völlig absorbiert, während Rot selbst zu etwa 95 % durchgelassen wird. Es entspricht dann der bei 2 gemessenen Energie die *Menge roten „falschen Lichtes"*, die bei 1 den Energiebetrag von $\lambda = 578 \mu\mu$ höher erscheinen lässt, als er in Wirklichkeit ist. So ergab sich, dass die Filterkombination für Gelb etwa 2 % falsches rotes Licht durchlässt. Bei Benutzung einer Lichtquelle mit kontinuierlichem Spekrum würde sich dieser Betrag etwas erhöhen.

Erwähnt sei noch, dass das Farbglas OG2 mit der Zeit bei Berührung mit $CuSO_4$-Lösung von dieser oberflächlich in der Politur angegriffen wird, es ist daher nicht rätlich, $CuSO_4$ und OG2 miteinander in direkten Kontakt zu bringen.

Tab. 4.

Durchlässigkeit des Filters OG1 (2 mm) + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm).

Wellenlänge in $\mu\mu$	$D = I/I_0$	$d = i\lambda x / i\lambda = 546 \mu\mu$
509	—	—
546	*0,75*	*1*
578	*0,66*	*0,88*
590	0,60	0,80
610	0,43	0,57
630	0,28	0,37
644	0,19	0,25
650	0,14	0,19
670	0,07	0,09
690	0,03	0,04
700	0,025	0,03
710	0,01	0,013
730	0,005	0,007

Farbfilter für Grün-Gelb ($\lambda = 546, 578\,\mu\mu$). OG1 (2 mm)[1] + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm). Fig. 7, II und Tab. 4.

Dieses Filter, das sich hinsichtlich der Absorption des Rot bzw. Ultrarot und Ultraviolett genau so wie das eben beschrieben Filter für Gelb (578 $\mu\mu$) verhält, lässt neben $\lambda = 578\,\mu\mu$ auch noch die Hg-Linie $\lambda = 546\,\mu\mu$ hindurch und zwar sogar noch etwas intensiver als $\lambda = 578\,\mu\mu$.

Farbfilter für Grün ($\lambda = 546\,\mu\mu$). OG1 (2 mm) + BG11 (15 mm)[2] + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm). Fig. 7, I und Tab. 5.

Tab. 5.

Durchlässigkeit des Filters OG1 (2 mm) + BG11 (15 mm) + BG9 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm).

Wellenlänge in $\mu\mu$	$D = I/I_0$	$d = I\,\lambda x / i\,\lambda = 546\,\mu\mu$
509	—	—
546	*0,62*	*1*
578	0,004	0,006
590	—	—
610	ca 0,30[3]	ca 0,48[3]
630	„ 0,28	„ 0,45
644	0,19	0,31
650	ca 0,14	ca 0,23
670	„ 0,06	„ 0,097
690	„ 0,03	„ 0,05
700	0,02	0,03
710	0,01	0,02
730	0,003	0,005
775	—	—

[1]) Für $\lambda = 546\,\mu\mu$ hat OG1 (2 mm) einschl. Reflexionsverluste einen D-Wert von 0,84 (vgl. S. 461, Anm.).

[2]) Für $\lambda = 546\,\mu\mu$ hat BG11 (15 mm) einschl. Reflexionsverluste einen D-Wert von 0,748 (vgl. S. 461, Anm.).

[3]) Wegen der ungleichmässig verlaufenden Bandenabsoprtion des Didymglases konnten einige Werte nach den vorhandenen Unterlagen nur angenähert berechnet werden.

Dieses Filter ist ebenso wie das vorher besprochene Filter zusammengesetzt, enthält aber noch ein Didymglasfilter, das die Wellenlänge 578 μμ absorbiert. Auch bei diesem Filter ist die *relative* Transparenz am grössten, wenn es zusammen mit BG9 gebraucht wird, wie wir das schon bei dem Gelbfilter sahen.

Der Ersatz des Didymglases durch eine Farbstofflösung, etwa Neptungrün oder Säuregrün ist wegen der geringen Transparenz dieser Filter für $\lambda = 546 \mu\mu$, wenn $\lambda = 578 \mu\mu$ gut absorbiert werden soll, nicht anzuraten. Infolge der Bandenabsorption des Didymglases ist indessen seine Benutzung bei Gebrauch einer Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum (Glühlampe) nicht immer ratsam, da das Glas eine ziemlich erhebliche Durchlässigkeit bei $\lambda = 610$—$620 \mu\mu$ hat.

Ultraviolett wird völlig absorbiert.

Die mit Hilfe von RG1 (2 mm) thermoelektrisch vorgenommene Prüfung der Filterkombination ergab, dass etwa 2 % falsches rotes Licht durchgelassen werden, wenn die Hg-Lampe als Lichtquelle dient (vgl. dazu S. 440).

Farbfilter für Grün und Blau ($\lambda = 546, 436 \mu\mu$). BG11 (15 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + Chininfilter (5 mm), (2g Chinin in 100 ccm norm. HCl, auf das 5-fache verdünnt), [+ BG9 (2 mm)]. Tab. 6.

Dieses Filter lässt neben $\lambda = 546$ und $436 \mu\mu$ auch noch die lichtschwache Linie $\lambda = 492 \mu\mu$ (vgl. Tab. 10) hindurch. Für Blau ist die Transparenz geringer als für Grün. Das Chininfilter in der Kombination dient nach O. Warburg und E. Negelein (1928) zur vollständigen U.-V. Absorption, es verschluckt ausserdem von $\lambda = 405 \mu\mu$ 99,7 %, während $\lambda = 436 \mu\mu$ zu 99 % durchgelassen wird. In dieser Zusammenstellung ist die Hinzuschaltung von BG9 unnötig, da das von der $CuSO_4$-Lösung durchgelassene wenige Ultrarot durch die Chininlösung noch weiterhin geschwächt wird, während andererseits BG9 die Trans-

Tab. 6. D-Werte des Filters: BG11 (15 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + Chinin 0,4 % (5 cm) [+ BG9 (2 mm)].

Wellenlänge in $\mu\mu$	BG11 (15 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm)					
	allein		+ Chinin 0,4 % (5 cm)			
			allein		+ BG9 (2 mm)	
	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\ \mu\mu}$	$D = \frac{I_0}{I}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\ \mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\ \mu\mu}$
334	0,03	0,07	—	—	—	—
366	0,47	1,07	—	—	—	—
405	0,47	1,07	—	—	—	—
436	*0,44*	*1*	*0,43*	*1*	*0,38*	*1*
480	0,42	0,95	0,42	0,98	0,39	1,03
509	0,46	1,05	0,46	1,07	0,42	1,11
546	*0,74*	*1,68*	*0,74*	*1,72*	*0,67*	*1,76*
578	0,005	0,01	0,005	0,01	0,005	0,01
590	—	—	—	—	—	—
610	0,40 [1])	0,83 [1])	0,40 [1])	0,84 [1])	0,30 [1])	0,71 [1])
630	0,38 [1])	0,79 [1])	0,38 [1])	0,8 [1])	0,28 [1])	0,67 [1])
644	0,26	0,54	0,26	0,54	0,19	0,45
650	0,19 [1])	0,4 [1])	0,19 [1])	0,4 [1])	0,14 [1])	0,33 [1])
670	0,09 [1])	0,19 [1])	0,09 [1])	0,19 [1])	0,06 [1])	0,14 [1])
690	0,05 [1])	0,11 [1])	0,05 [1])	0,11 [1])	0,03 [1])	0,07 [1])
700	0,04	0,08	0,04	0,08	0,02	0,05
710	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01	0,02
730	0,007	0,014	0,007	0,014	0,003	0,007
775	—	—	—	—	—	—

[1]) Wegen Bandenabsorption des Didymglases konnte dieser Wert nach den vorhandenen Unterlagen nur angenähert berechnet werden.

parenz für die Linie 436 μμ noch mehr verschlechtern würde.

Bei Benutzung der Hg-Lampe als Lichtquelle werden von der vollständigen Filterkombination (mit oder ohne BG9) ca 1,2 % falsches rotes Licht durchgelassen (vgl. S. 440).

Farbfilter für Blau (*λ = 436* μμ). Fig. 6, I, II, III und Tab. 7.

Nr. I. BG4 [1]) (1 mm) + GG3 (1 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + [BG9 (2 mm)].

Nr. II. BG4 (2 mm) + GG3 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + BG9 (2 mm)

Nr. III. BG4 (1 mm) + GG3 (2 mm) + [$CuSO_4$ 6 % (1 cm)] + [BG9 (2 mm)] + BG3 (0,5 mm)

Nr. IV. BG4 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + Chinin 0,4 % (5 cm).

Bei der Isolierung der blauen Hg-Linie 436 μμ kann man sich verschiedener Kombinationen bedienen, je nachdem man mehr Wert auf hohe Monochromasie oder auf hohe Transparenz legt. Gut monochromatisch sind die Filter Nr. II und IV; die höchste Transparenz für λ = 436 μμ weisen die Filter Nr. I und IV auf; den grössten Abfall in dem Bezirk zwischen λ = 436 und 509 μμ, der freilich bei der Hg-Lampe keine intensitätsstarken Linien besitzt, hat das Filter Nr. III. $CuSO_4$ wird besser zugeschaltet, dagegen ist BG9 gewöhnlich nicht nötig, weil das Glas BG4 im Rot und Ultrarot bereits so stark absorbiert, dass es den kleinen Durchlässigkeitsbereich des $CuSO_4$-Filters in diesem Spektralbezirk praktisch kompensiert. Die von den 4 Kombinationen durchgelassenen Mengen falschen roten Lichtes (vgl. S. 440) sind daher sehr klein, wie folgende Uebersicht zeigt:

Filter Nr. I. hat eine Rotdurchlässigkeit von	0,5 %	Hg-Lampe als Lichtquelle, jeweils die *volle* Filterkombination.
„ „ II. „ „ „ „	0,3 %	
„ „ III. „ „ „ „	0,4 %	
„ „ IV. „ „ „ „	0,3 %	

[1]) Für λ = 436 μμ hat BG4 (2 mm) einschl. Reflexionsverluste einen D-Wert von 0,696 (vgl. S. 461, Anm.).

Tab. 7.

Durchlässigkeit der Blaufilter Nr. I, II, III, IV.

Wellenlänge in $\mu\mu$	Filter Nr. I		Filter Nr. II		Filter Nr. III		Filter Nr. IV	
	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\,\mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\,\mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\,\mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 436\,\mu\mu}$
	(ohne BG9)				(Ohne BG9 u. $CuSO_4$)			
334	0,003	0,005	—	—	—	—	—	—
366	0,12	0,19	0,006	0,015	0,02	0,04	—	—
405	0,125	0,39	0,02	0,05	0,03	0,07	—	—
436	*0,64*	*1*	*0,40* [1]	*1*	*0,47* [2]	*1*	*0,698*	*1*
480	0,52	0,81	0,25	0,63	0,21	0,45	0,28	0,4
509	0,16	0,25	0,023	0.06	0,016	0,03	0,025	0,036
546	0,01	0,014	—	—	—	—	—	—
578	0,008	0,013	—	—	—	—	—	—
590	—	—	—	—	—	—	—	—

[1]) Der D.Wert beträgt 0,45 für $\lambda = 436\mu\mu$, wenn Filter II ohne BG9 gebraucht wird.

[2]) D = 0,425, wenn $CuSO_4$ mit eingeschaltet ist, und D = 0,38, wenn $CuSO_4$ + BG9 (2 mm) zugeschaltet ist, beides für $\lambda = 436\mu\mu$.

Bei einer Lichtquelle mit kontinuierlichem Spektrum dürften diese Fehlerwerte (falsches rotes Licht!) wohl gleich niedrig bleiben.

Die Absorption des U.-V. variiert bei den einzelnen Filtern, sie wird bei den Filtern I—III durch Einschaltung von BG9 vergrössert. Bei Filter Nr. IV. mit der Chinin-Lösung als U.-V.-Absorbens ist BG9 unnötig, überhaupt ist dieses Filter bei Benutzung der Hg-Lampe allen anderen 3 Filtern vorzuziehen, sofern man $\lambda = 436\ \mu\mu$ möglichst intensiv und doch rein isolieren will. Bei einer Glühlampe als Lichtquelle ist Filter Nr. IV jedoch den anderen drei Kombinationen nicht so überlegen, weil sein Vorteil in der restlosen Absorption des U.V. liegt, das von Glühlampen nur in geringem Masse emittiert wird. Hier leisten die Filter I—III, die nur eine Küvette notwendig haben, gleich gute Dienste.

Zur Tab. 7 und Fig. 6, I, II, III ist zu bemerken, dass nur für die Filter Nr. II und IV die Kurven bzw. D-Werte der *vollständigen* Kombination entsprechen, während bei den anderen 2 Filtern die Absorption von BG9 bzw. der $CuSO_4$-Lösung nicht in die Berechnung einbegriffen worden sind.

Farbfilter für Ultraviolett ($\lambda = 366\ \mu\mu$). Fig. 6, I und Tab. 8. I: UG2 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm). II: UG2 (3 mm) + GG12 (½ mm).

Von beiden genannten Kombinationen ist das Filter II (UG2 3 mm + GG12 ½ mm, zusammengekittet) für $\lambda = 366\ \mu\mu$ praktisch monochromatisch, denn $\lambda = 405\ \mu\mu$ sowie Rot und Ultrarot werden, zumal in Verbindung mit 5 cm Wasserschicht nahezu *gänzlich* absorbiert. Da GG12 stark fluoresziert, muss dieses Glas *zuerst* von dem Hg-Licht getroffen werden.

Filter Nr. I ist auch noch gut monochromatisch, aber nicht so transparent, da $CuSO_4$ ziemlich viel vom U.-V. verschluckt. Gebraucht man das Filter ohne $CuSO_4$ oder nur mit H_2O, so kann unter Umständen die intensive Linie

312/313 μμ (λ = 334 μμ ist ähnlich wie λ = 492 μμ ziemlich lichtschwach!) der Hg-Lampe störend wirken.

Tab. 8.

D-Werte der Ultraviolettfilter I und II. (UG2).

Wellen-länge in μμ	I. UG 2 (2 mm)		I. UG2 + $CuSO_4$		II. UG2 + GG12 (½ mm)	
	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 366\,\mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 366\,\mu\mu}$	$D = \frac{I}{I_0}$	$d = \frac{i\lambda x}{i\lambda = 366\,\mu\mu}$
302	0,006	0,008	—	—	—	—
312	0,22	0,29	<0,11 [1])	—	—	—
334	0,62	0,82	<0,31 [1])	—	0,11	0,19
366	*0,76*	*1*	*0,38*	*1*	*0,58*	*1*
405	0,01	0,01	0,007	0,02	—	—
700	0,01	0,02	—	—	—	—
775	0,09	0,13	—	—	0,03	0,05
850	0,04	0,05	—	—	0,007	0,01
950	0,01	0,02	—	—	0,002	0,003
1050	0,008	0,01	—	—	—	—
1150	0,005	0,006	—	—	—	—
1300–2000	0,004	0,005	—	—	—	—
2200	0,006	0,008	—	—	—	—
2400	0,01	0,02	—	—	—	—
2600	0,03	0,04	—	—	0,005	0,009
2800	0,05	0,06	—	—	0,009	0,015
3000	0,04	0,05	—	—	0,006	0,009

[1]) Genauere Unterlagen für die Absorption von $CuSO_4$ bei diesen Wellenlängen fehlen uns!

D. DIE EINRICHTUNGEN ZUR VARIATION DER LICHTINTENSITÄT.

Bei einer mit Spalten und Linsen arbeitenden Beleuchtungsapparatur ist es oft nicht möglich, die gewünschte Lichtintensität nach der Regel des optischen Entfernungsgesetzes $I = I_0/r^2$ (r = Abstand der Lichtquelle von dem Punkt, wo I herrschen soll) herzustellen [1], da Lichtquelle und Beleuchtungslinsen usw. *bestimmte* Abstände untereinander haben müssen. Man verwendet dann Blenden, Drahtnetze und Neutralgläser zur Erzeugung der verschiedenen Lichtintensitäten.

Bei unserer Apparatur sind *verstellbare Irisblenden* an dem Kollektor hinter der Lichtquelle (Fig. 2), dem Compoundverschluss (Fig. 2) und den beiden Trioplanobjektiven (Fig. 3) angebracht. Mit Hilfe der Irisblenden an diesen Objektiven werden bei antagonistischer Beleuchtung von Versuchspflanzen die beiden Strahlenbündel intensitätsgleich gemacht.

Ein verfügbares *geschwärztes Drahtnetz* schwächt das hindurchgelassene Licht auf 36,6 % (D = 0,366) des auffallenden ab.

Als Neutralglas dient das Schottglas NG5 (Liste 4213) in 2 mm Dicke. Ueberdies haben wir von diesem Neutralglas einen mittels Spindel verschiebbaren Doppelkeil zur Verfügung, mit dem man bei Spaltbildern kontinuierliche Lichtabschwächung vornehmen kann. Jede Keilhälfte beginnt mit einer Glasdicke von 0,5 mm und endigt bei 9 cm Länge mit einer Dicke von 5,5 mm. Die Keilkonstante beträgt

---

[1]) Die Lichtabschwächung nach dieser rechnerischen Methode bedarf übrigens oftmals der experimentellen *Kontrolle durch direkte Lichtmessung*, da das Entfernungsgesetz nur für punktförmige Lichtquellen gilt, während man meistens mit mehr oder weniger räumlich ausgedehnten Lichtquellen und obendrein noch geringen Abständen von diesen arbeitet. Durch alleinige Berechnung von I können unter Umständen Fehler von mehr als 50% entstehen, was vielfach bei lichtphysiologischen Untersuchungen nicht berücksichtigt wird (vgl. dazu F. Weigert, 1927, S. 115ff).

somit 0,168 für $\lambda = 436\ \mu\mu$ [1]), da der Einzelkeil pro cm um 0,5 mm an Dicke zunimmt. Tab. 9 gibt die D-Werte von NG5 für einige Wellenlängen.

TAB. 9.

Durchlässigkeit des Neutralglases NG5 (2 mm).

Wellenlänge in $\mu\mu$	$D = I/I_0$		Wellenlänge in $\mu\mu$	$D = I/I_0$	
	Ohne Reflexionsverluste.	Mit Reflexionsverlusten.		Ohne Reflexionsverluste	Mit Reflexionsverlusten.
334	—	—	546	0,44	0,40
366	0,084	0,077	578	0,46	0,424
405	0,28	0,259	644	0,49	0,45
436	0,35	0,319	700	0,49	0,45
480	0,4	0,365	775	0,42	0,388
509	0,42	0,388	850	0,37	0,341

Da die D-Werte von NG5 für die verschiedenen Wellenlängen im sichtbaren Spektrum nicht genau gleich gross sind, so ist dieses Filter zur Lichtabschwächung von *zusammengesetztem weissen Licht* nur bedingt geeignet. Das Gleiche gilt auch von wenig, aber gleichmässig geschwärzten photographischen (ausfixierten) Platten, die man bei geringen Ansprüchen auch als Neutralgläser verwenden kann.

Dagegen sind die geschwärzten Drahtnetze (siehe oben) für die Abschwächung weissen Lichtes sehr tauglich, da sie für alle Wellenlängen den gleichen Abschwächungskoeffizienten haben. Einzelheiten darüber siehe man bei Plotnikow (1930, S. 1817) nach.

Neben diesen 3 Möglichkeiten zur Variation der Lichtintensität gibt es bei Gebrauch der Hg-Lampe noch eine vierte, nämlich *Aenderung der Belastung der Lampe,* bzw. der Voltspannung des Lichtbogens. Der in dem Stromkreis der Lampe liegende Widerstand muss dann regulierbar sein (Fig. 4), und es ist möglich, je nach der, an einem Mess-

[1]) Als Keilkonstante k bezeichnet man die Dichtezunahme eines Keils pro cm seiner Länge. Hat ein Keil an einem Punkte seiner Länge den D-Wert D, 1 cm weiter den kleineren Wert D_1, so ist $k = \log (D/D_1)$. Vgl. dazu Eder (1920). Unsere Keile sind von J. Möller, Wedel bei Hamburg, geschliffen worden.

instrument abzulesenden Spannung des Lichtbogens sehr verschiedene Lichtintensitäten in dem Verhältnis von etwa 1 : 100 (für $\lambda = 436\,\mu\mu$) zu bekommen, wobei die Spannung einer für 220 Volt Gleichstrom bestimmten Lampe an den Elektroden zwischen 25 und 180 Volt variiert. Das Intensitätsverhältnis der einzelnen *sichtbaren* Spektrallinien untereinander bleibt dabei ziemlich gleich, wie man auch an der gleichbleibenden Lichtfarbe subjektiv sehen kann.

Glühlampen lassen sich nach diesem Prinzip nicht in ihrer Lichtstärke regulieren, es sei denn, man nimmt die je nach der Stromstärke bzw. Glühtemperatur des Leuchtfadens *sehr verschiedene Intensitätsverteilung* im Spektrum mit in Kauf.

4. Die Apparate zur Messung des Lichtes.

A. ALLGEMEINES.

Da dem Sekundenmeterkerzensystem ein anthropomorpher Charakter nicht abgesprochen werden kann, und dieses System überdies bei der Messung monochromatischer Strahlung versagt, kommt als *geeigneter Vergleichsmaszstab* für unsere Zwecke nur die *Messung des Lichtes in absoluten Einheiten* in Frage. In der Regel drückt man die Intensitäten von strahlender Energie in Erg oder Watt aus, wobei
1 Erg = 10^{-7} abs. Wattsekunden = $2{,}389.10^{-8}$ cal ist.
[1 cal = $4{,}186.10^{7}$ Erg].
Wir beziehen diese Energie auf die Einheit der Zeit und der Fläche, auf die sie fällt, und haben somit:
1 Erg/(cm^{2}sec) = 10^{-7} Watt/cm^2 = $2{,}389.10^{-8}$ cal/(cm^{2}sec).

Ferner sei noch erwähnt, dass eine Hefnerlampe in 1 m horizontalem Abstand etwa 900 Erg/sec auf eine senkrechte Fläche von 1 cm^2 strahlt, wovon nur etwa 1 $^0/_0$, also ca 9 Erg, auf das sichtbare Spektralgebiet entfällt. [1])

Für die *eigentliche* Messung der Energie in absoluten Einheiten ist allein die thermoelektrische oder bolometrische

[1]) Literatur darüber in jedem grösseren Lehrbuch der Physik, z.B. O. D. Chwolson (1922); S. 445—447. Ferner F. Kohlrausch (1927): Lehrbuch der praktischen Physik, S. 442, u.a.m.

Methode brauchbar, da bei ihr als Strahlungsempfänger ein *nicht selektiv* absorbierender *schwarzer Körper* dient oder wenigstens dienen sollte. Alle anderen Messmethoden z.B. Photozellen oder photographische Methoden können nur als *sekundär* arbeitende Messapparaturen verwendet werden, da sie mehr oder weniger selektiv gegenüber den verschiedenen Wellenlängen der zu messenden Energie sind und daher immer erst mit Hilfe eines nicht selektiven Messinstrumentes geeicht werden müssen. Für unsere Zwecke scheidet aus verschiedenen Gründen von vornherein die photographische Methode und die *subjektive* Spektralphotometrie aus, dagegen ist die Photozellenmethode sehr wohl brauchbar, da sie vor allem in den kürzer welligen Spektralbezirken sehr empfindlich ist, wo wegen der geringeren Quantenzahl der Strahlung nur eine geringe Wärmeerzeugung bei Absorption durch eine schwarze Oberfläche vorhanden ist.

Unsere Apparatur zur Lichtmessung besteht aus folgenden Instrumenten:

1. Mikrothermosäule nach Moll, (Kipp & Zonen, Delft),
2. Schleifengalvanometer von Zeiss-Jena,
3. Lichtelektrisches Photometer nach Elster und Geitel-Dorno (Günther & Tegetmeyer, Braunschweig), bzw. verschiedenen photoelektrischen Zellen.

Die *Mikrothermosäule nach Moll* hat trotz kleiner Ausmasse und kleiner Auffangfläche von nur 6 mm ø grosse Empfindlichkeit. Infolgedessen kann man mit ihr die Energien von Lichtströmen mit nur geringem Querschnitt, wie sie bei Spaltbeleuchtungen vorkommen, messen. Die Einstellzeit ist kurz (ca 2 Sek.), sodass es möglich ist, bei Strahlungsmessungen etwa störende Einflüsse fremder vagabundierender Wärmestrahlung leicht zu erkennen und unschädlich zu machen. In Verbindung mit dem Schleifengalvanometer hat man so eine gut empfindliche und auch *leicht tragbare* Messeinrichtung für Energiestrahlung.

Auf einen Punkt muss man bei Verwendung von Thermosäulen genau achten, um unliebsame Messfehler zu vermeiden: *das Vorhandensein einer wirklich einwandfreien schwarzen Auffangfläche,* die mit

besonders präpariertem Russ oder Platinschwarz hergestellt ist. Unsere Thermosäule genügte ursprünglich nicht dieser Kardinalforderung und wies ziemlich erhebliche selektive Absorption und Empfindlichkeit für die einzelnen Strahlengattungen auf, erst nachträglich konnte dieser Fehler beseitigt werden (vgl. S. 455).

Das *Schleifengalvanometer von Zeiss* hat den Vorteil, gegen Temperatureinflüsse und vor allem Erschütterungen weniger als ein Drehspulgalvanometer empfindlich zu sein, sodass es auch im Freien bequem gebraucht werden kann (vgl. Handb. d. Physik, Bd. 16, 1927). Man sieht es in Tafel VIII, A oben in der Mitte auf dem Deckel des Versuchsthermostaten stehen.

Das *lichtelektrische Photometer* nach Elster, Geitel und Dorno (hergestellt von Günther & Tegetmeyer, Braunschweig) hat als die Strahlung auffangende Körper Photozellen, und zwar eine *Kalium-Argon*-bzw. *Kalium-Vakuum-Photozelle* für sichtbares Licht und eine *Kadmium-Argon-Photozelle* für die Messung des Ultraviolett. Als Messinstrument für den lichtelektrischen Strom, dessen Stärke ein Masz für die Intensität des auf die Photozellen fallenden Lichtes bildet, dient bei Messungen im Freien oder überhaupt überall da, wo es sich darum handelt, eine *fest vorhandene* Lichtintensität zu bestimmen, ein Wulf'sches Einfadenelektrometer, wobei dann nach der sog. „Entladungsmethode" (vgl. C. Dorno, 1926/1927 und H. Geitel, 1921) gearbeitet wird. Bei Versuchen jedoch, wo man die den Pflanzen zugeführten Lichtenergieen in ihrer Intensität „abstimmen" muss, ist es besser, die Photozellen mit einem Galvanometer und einer Hilfsbatterie (H. Geitel, 1921) zu verbinden, und diese Methode verwenden wir bei unseren Versuchen. Der Nachteil der Photozellen ist der, dass sie *selektiv* für die verschiedenen Spektralbezirke empfindlich sind (vgl. Fig. 9), besonders im Rot ist die Empfindlichkeit der Kalium-Argonzelle sehr gering, dem steht aber der Vorteil gegenüber, dass die Zellen auf Ultrarot nicht ansprechen. Ueberdies kann man mit der *Kadmium-Argon-Zelle* gut die ultraviolette Strahlung messen, wo man sonst (ausser bei der in diesem Spektralbezirk sehr intensiven Hg-Lampe) bei Anwendung der bolometrischen oder Thermosäulen-Methode besonders empfindliche und damit schwierig zu handhabende Galvanometer nötig hat.

B. DIE TECHNISCHE AUSFÜHRUNG DER STRAHLUNGSMESSUNGEN.

I. *Mit Thermosäule und Galvanometer.*

Um eine monochromatische Strahlung in absoluten

Einheiten mittels Thermosäule und Galvanometer zu messen, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. muss die Strahlung auch wirklich monochromatisch sein, darf also z.B. bei sichtbarem Licht *keine Spur* von langwelliger Wärmestrahlung enthalten,
2. muss die Voltempfindlichkeit und der innere Widerstand des Galvanometers bekannt sein,
3. muss der innere Widerstand und die Empfindlichkeit der Thermosäule festgestellt sein, d.h. die Anzahl Mikrovolt, die durch eine bestimmte Anzahl Erg/sec in der Thermosäule erzeugt werden.

Die Bedingung 1. haben wir schon im Abschnitt 3, C erwähnt. Die dort genannte $CuSO_4$-Lösung + Filter BG9 genügt bei den von uns gebrauchten Lichtquellen, um ein praktisch Ultrarot-freies Licht zu bekommen. Sekundäre langwellige U.-R.-Strahlen sind nicht zu befürchten, denn bei unserer Anordnung erwärmt sich die $CuSO_4$-Lösung erst bei mehrstündiger stärkerer Bestrahlung um 1—2 Grad, ausserdem sorgt der auch bei Versuchen mit stärkeren Glühlampen angestellte Ventilator, dessen Zuleitungsrohr bei Nichtbenützung der Hg-Lampe über oder neben dem Glühlampenhaus festgesetzt wird, für eine schnelle Abfuhr aller erwärmten Luft, die sich in der Nähe der Lampe bzw. Filter befindet.

Zur Prüfung der mit Filtern erzeugten monochromatischen Strahlung in bezug auf genügende Reinheit hinsichtlich des Ultrarot-Gehaltes kann 1. die Methode von O. Warburg und E. Negelein (1928) gebraucht werden (vgl. S.440), wobei mittels Zwischenschaltung eines Glases RG1, RG2 oder RG5, die sämtlich U.-R. und dunkles Rot vollständig durchlassen, das übrige Licht aber völlig absorbieren, festgestellt wird, wieviel Energie die zu prüfenden Filter noch passieren lassen.

2. kann man die Unempfindlichkeit der photoelektrischen Zellen gegenüber Ultrarot als Anzeigemittel verwenden, ob ein Filter noch langwellige Wärmestrahlung durchlässt. Wir isolieren z.B. $\lambda = 436\ \mu\mu$ mittels einer Filterkombination und messen die durchgelassene Energie zuerst mit Thermosäule, dann mit Photozelle. Darauf wird die

gleiche Wellenlänge mit einem Monochromator, der kein U.-R. durchlässt, isoliert und wieder zuerst mit der Thermosäule, dann mit der Photozelle gemessen. Ist in beiden Fällen das Zahlenverhältnis zwischen den Galvanometerausschlägen der Thermosäule und denen der Photozelle das Gleiche, so ist anzunehmen, dass das zu prüfende Filter kein Ultrarot durchlässt. Ist jedoch das Zahlenverhältnis beim Filter zu Gunsten der Thermosäule verschoben, so wird nicht alles U.-R. vom Filter absorbiert.

Für die Anwendung der 2ten Methode ist Bedingung, dass der Durchlässigkeitsbereich der Filter möglichst scharf abgegrenzt ist, also keine verlaufende Absorptionskurve aufweist, weil sich sonst Durchlässigkeit des Filters und Durchlässigkeit des Monochromators nicht zur Deckung bringen lassen, und infolgedessen die selektive Farbenempfindlichkeit der Photozelle von Einfluss werden kann. Die nach dieser 2ten Methode vorgenommene Prüfung unserer Blaufilter ergab ebenso wie die Prüfung nach der 1ten Methode (vgl. S. 445), dass sich in den von den Filtern durchgelassenen Blauenergie *weniger* als $^1/_2$ % Ultrarot befindet.

Faktor 2., die Empfindlichkeitskonstanten des Galvanometers, lässt sich in der üblichen Weise mittels Widerständen, definierter Stromquelle usw. (vgl. Handb. Phys. Bd. 16, 1927) feststellen. Unser Schleifengalvanometer hat folgende Konstanten: Schleifenwiderstand = 5,81 Ohm.

Strom- und Spannungsempfindlichkeit: pro Skalenteil:

Stabile Lage: Vergrösserung 640x: 1p = $3{,}21.10^{-7}$ V = $5{,}52.10^{-8}$ Amp.

Labile Lage: Vergrösserung 640x: = $6{,}29.10^{-8}$ V = $1{,}084.10^{-8}$ Amp.

Vergrösserung 80x: = $5{,}21.10^{-7}$ V = $8{,}98.10^{-8}$ Amp.

Faktor 3. konnten wir dadurch berücksichtigen, dass wir unsere Thermosäule nach einer *absolut* geeichten Thermosäule des Physikalischen Institutes, Utrecht, sekundär eichten, indem die Strahlung verschiedener Lichtquellen nacheinander mit der absoluten Säule und mit unserer Säule gemessen wurde. Bei diesen Messungen konnte auch die anfänglich vorhanden gewesene Selektivität unserer Mikrothermosäule (vgl. S. 453) festgestellt werden; sie wurde durch Neuberussen mit Terpentinruss und

Anbringen einer kleinen schwarzen Blende behoben. Bei *vorsichtiger Behandlung* blieb alsdann die einmal festgestellte Empfindlichkeit konstant.

Beispiel für eine sekundäre Eichung einer Thermosäule nach einer absolut geeichten Thermosäule.

Die Eichung unserer Mikrothermosäule erfolgte folgendermassen:
1. Mikrothermosäule und absolute Thermosäule werden in gleichem Abstand von einer Wolframbandlampe aufgestellt, die mit konstanter Stromstärke von 16 Amp. brennt. Das Licht passiert zuvor eine $CuSO_4$ -Küvette und ein Diaphragma, ehe es die gleichmässig belichteten Säulen trifft.

Der von beiden Säulen erzeugte Strom wird abwechselnd durch einen Kommutator einem Spiegelgalvanometer nach Moll zugeführt.
2. Alsdann ist der Galvanometer-Ausschlag bei der *absoluten Säule* = *63,0 mm*, bei der *Mikrosäule* = *23,8 mm.*
3. Jetzt wird für beide Säulen die Voltempfindlichkeit des Galvanometers bestimmt.

Mit Hilfe einer Potentiometer-Shunt-Schaltung gibt ein Akkumulator eine Spannung von $1,63.10^{-5}$ V. Wird an diese Spannung der Stromkreis: 'Galvanometer — Absolute bzw. Mikro-Säule' angeschlossen, so ergeben sich für beide Thermosäulen folgende Ausschläge:

Absolute Säule:	*Mikrosäule:*
$1,63.10^{-5}$ V = 17 mm.	*$1,63.10^{-5}$ V = 20 mm.*

Hieraus folgt:

Absolute Säule:	*Mikrosäule:*
$\frac{63}{17} \cdot 1,63.10^{-5}\ \mathrm{V} = 6,04.10^{-5}\ \mathrm{V}.$	$\frac{23,8}{20} \cdot 1,63.10^{-5}\ \mathrm{V} = 1,94.10^{-5}\ \mathrm{V}.$

4. Wenn nun bekannt ist, dass die *absolute Säule* bei einer Energieaufnahme von $4,31.10^{-6}$ Watt/cm²

= 1.10^{-5} V. erzeugt, so entsprechen

$6,04.10^{-5}$ V = 6,04. $4,31.10^{-5}$ Watt/cm² = *$26,02.10^{-5}$ Watt/cm².*

Bei der *Mikrothermosäule* sind dementsprechend:

$26,02.10^{-5}$ Watt/cm⁵ = $1,94.10^{-5}$ V, oder

1.10^{-5} Volt = $13,42.10^{-5}$ Watt/cm² = 1342 Erg/(cm²sec).

Aus diesem Wert und den oben mitgeteilten Empfindlichkeitsdaten des Schleifengalvanometers ergibt sich für unsere Versuchsanordnung durch Multiplikation, dass 1 Galvanometer-Skalenteil folgenden Energiewerten entspricht:

Stabile Lage: Vergrösserung 640 ×:
1p = 43 Erg/(cm²sec) (= 11,15 Erg/sec)
Labile Lage: Vergrösserung 640 ×:
= 8,44 Erg/(cm²sec) (= 2,188 Erg/sec)
Labile Lage: Vergrösserung 80 ×:
= 69,9 Erg/(cm²sec) (= 18,13 Erg/sec)

(Die in Klammern mitgeteilten Erg/sec-Werte geben den *absoluten Energiebetrag* an, der auf die Oberfläche der Thermosäule fällt; sie sind = 100/25,92 Erg/(cm²sec), wenn 25,92 mm² (= 5,75 mm ø) die Grösse der freien Blende der Säule ist.)

Mit Hilfe dieser Daten wird von uns *immer vor jedem Versuch* unmittelbar am Standort der Pflanze, also in der abgeteilten Versuchskammer des Versuchsthermostaten (vgl. S. 421, 432) die Strahlungsenergie gemessen. Die Türen der Kammer sind dabei geschlossen, damit sich der Messvorgang frei von äusseren Störungen (Luftströmungen, vagabundierende Wärmestrahlung usw.) abwickelt. Die Thermosäule ist leicht verschiebbar und abnehmbar an einem Halter (Fig. 3 und 10) befestigt, die Grösse des Spaltbildes wird durch Projektion auf die Bewegliche Skala (Fig. 3) festgestellt. Wünscht man mit einer Spaltbildgrösse zu arbeiten, die kleiner als der Blendendurchmesser der Thermosäule ist, so wird die gewünschte Ausdehnung des Spaltbildes erst *nach* der Energiemessung mit Hilfe des verstellbaren Spaltes (Fig. 2) vorgenommen, da bei der Strahlungsmessung selbst die ganze Blendenöffnung der Thermosäule beleuchtet sein muss, um fehlerhafte Messungen zu vermeiden. Eine Aenderung der auf die *Flächeneinheit* fallenden Energiemenge findet dabei *nicht* statt.

II. *Mit Photozelle und Galvanometer.*

Meistens kann man die Energiemessung mit der Thermosäule durchführen. Ist jedoch der Energiestrom bei geringer Dichte relativ ausgedehnt, so ist die Mikrosäule wegen ihrer kleinen Auffangfläche für die Strahlung nicht emfindlich genug und besser durch die Photozelle zu ersetzen.

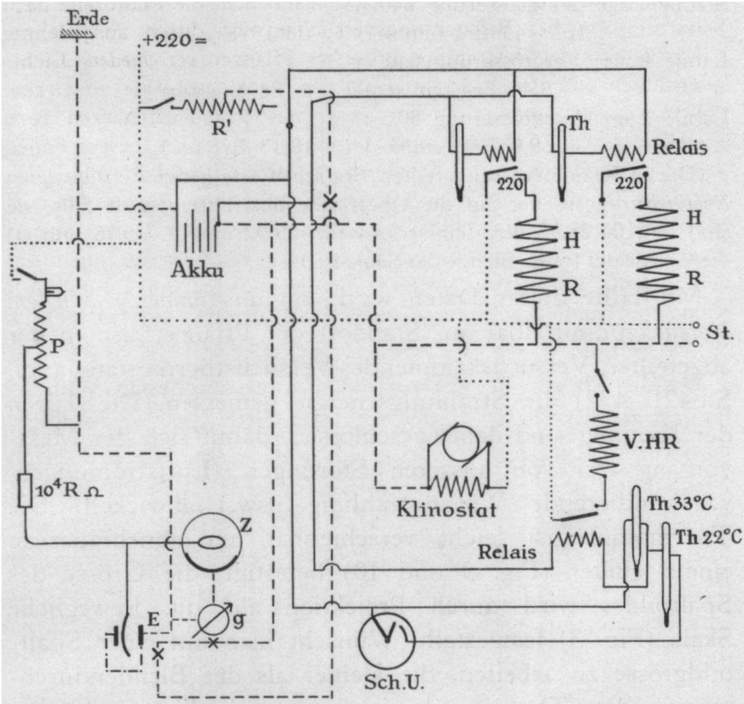


Fig. 8. Schaltschema der Photozelle, der beiden Thermostaten, des Klinostaten und der Schaltuhr mit Mesokotyl-Vorerwärmung. *Erklärungen:* P = Potentiometer, R = Widerstand von 10.000 Ohm, G = Schleifelgalvanometer, Z = Photozelle, E = Einfadenelektrometer, R' = Vorschaltwiderstand zum Betrieb der Ableseglühlämpchen (x), Th = Kontaktthermometer der beiden Thermostaten, H—R = Heizwiderstände der Thermostaten, Akku = Akkumulator für die Kontaktthermometer und den Antrieb der Hg-Relais (Relais), Sch.U. = Schaltuhr, V.HR = Heizwiderstand der Mesokotyl-Vorerwärmung, Th 32° C, 22° C = Thermometer der Mesokotyl-Vorerwärmung, St = Steckkontakt. Die ganze Schaltung ist so eingerichtet, dass der Akkumulator bei Benutzung der Apparatur stets automatisch wiederaufgeladen wird.

Das Gehäuse der Zelle sei so eingerichtet, dass sich leicht Blenden, Filter usw. in den Strahlengang einschalten lassen. In Verbindung

mit einem vorgesetzten Milchglas z.B. kann man die Photozelle dazu benutzen, um bei Beleuchtungsversuchen, wo durch ausgedehnte Lichtquellen oder Bestrahlung grösserer Pflanzen *verschiedene* Lichtintensitäten auf die einzelnen Teile der Versuchsobjekte einwirken, die maximalen und minimalen bzw. *mittleren* Lichtstärken festzustellen [1]. Ein Arbeiten mit Thermosäule wäre in diesem Fällen kaum möglich, weil die Abschirmung der Ultrarot-Strahlung zu schwierig ist. Dies gilt auch z.T. für Versuche im Freien. Dort ist aber bei Anwendung der Photozellenmethode nach Dorno anstatt eines Galvanometers besser ein *Elektrometer* als Messinstrument zu gebrauchen. Wir besprechen hier nur die von uns angewandte Galvanometer-Methode. Näheres siehe man bei H. Geitel (1921), C. Dorno (1924, 1926/27) und V. E. Shelford (1929) ein.

Da die Photozelle *selektiv* für die verschiedenen Wellenlängen empfindlich ist, so muss zunächst die Empfindlichkeitskurve festgestellt werden, ehe man sie zu absoluten Messungen gebrauchen kann. Wir taten das auf die gleiche Weise wie C. Dorno (u. K. W. Meissner, (1924) mit Hilfe eines Monochromators. Vor dem Monochromator (S. 432) wurde eine Niedervoltlampe aufgestellt, hinter den Monochromator kam zuerst die sekundär geeichte Mikrothermosäule, nachher die Photozelle. So erhielten wir die Kurven, die in Fig. 9 mit logarithmischen Ordinaten wiedergegeben sind.

Von der Nitralampe ist eine *relative* Energieverteilungskurve wiedergegeben, bei der man beachten muss, dass die Absorptionsverluste im Monochromator *nicht* in Rechnung gezogen wurden.

Die erhaltene Empfindlichkeitskurve der Kalium-Argon-Zelle weist eine ähnliche Gestalt auf, wie sie auch Dorno (1924) gefunden hat, also mit einem Empfindlichkeitsmaximum bei etwa $\lambda = 445\ \mu\mu$. Bemerkenswert, ist dass die Empfindlichkeitskurve in dem logarithmischen Ordinatensystem zum grossen Teil geradlinig verläuft. Im ultravioletten Spektrum konnten wir die Kurve nicht genauer

[1]) Ueber die Auswertung der so gemessenen Lichtintensitäten in absolutem Mass siehe S. 460, 461.

festlegen, daher sie auch punktiert gezeichnet ist; es wurde nur bei $\lambda = 366\,\mu\mu$ gemessen, wobei diese Wellenlänge mittels des Filters UG2 (3 mm) + GG12 (½ mm) (S. 447) und der Hg-Lampe isoliert und erzeugt wurde.

Ueber weitere Einzelheiten der Messung unterrichtet das in Tab. 10 (S. 463) wiedergegebene Protokoll, aus dem man ebenso wie aus der Kurve Fig. 9 z.B. ersehen kann, dass bei $\lambda = 436\,\mu\mu$ 1p des Galvanometers = 1,85 Erg/sec entspricht, wenn die Photozelle als Messinstrument gebraucht wird. Will man aus den Werten der Tab. 10 die Erg/sec auf cm^2 zurückführen, so muss man die jeweilig benutzte Blendenöffnung der Photozelle berücksichtigen. Findet man z.B., dass ein Energiestrom grösseren Durchmessers, der auf die Photozelle, die mit der grössten Blende $\varnothing = 1520\ mm^2$ versehen ist, so geleitet wird, dass die Strahlung die Blende völlig ausfüllt, bei $\lambda = 436\,\mu\mu$ einen Ausschlag von 1p bewirkt, so ist die Intensität der Strahlung pro cm^2 = $1{,}85 \cdot \frac{100}{1520} = 0{,}1217$ Erg/(cm^2sec). Man sieht daraus, dass die Photozelle ganz bedeutend empfindlicher als die Mikrothermosäule ist, wenn es sich um die Messung von Energieströmen *grösseren Durchmessers* handelt, da dabei die wesentlich grössere Oberfläche der Photozelle von Vorteil ist, wobei aber vorausgesetzt ist, dass die betreffende Strahlung in den Bereich des Optimums der spektralen Empfindlichkeitskurve der Photozelle fällt.

Photometriert man mit der Zellenmethode rein monochromatische Strahlung, z.B. die sichtbaren Wellenlängen der Hg-Lampe, so kann man, wie wir eben sahen, ohne weiteres zu *absoluten Erg-Werten* gelangen. Misst man dagegen eine *inhomogen* strahlende Lichtquelle, etwa eine Glühlampe, so ist die Erzielung absoluter Werte umständlicher, da die Photozelle nicht so wie die Thermosäule über die gesamte zu messende Energie einen spektralen Integralwert liefert. [1])

---

[1]) Ist von der zu messenden Lichtquelle die Energieverteilungskurve genau bekannt, so könnte man so verfahren, wie es Fig. 9 zeigt, d.h. man trägt die Energiekurve (*ausgedrückt in Erg*) und die durch den Faktor J/E (J = Energie der Lichtquelle für $\lambda = x$, E = Erg-Empfindlichkeit der Photozelle für $\lambda = x$) bedingte Kurve

In der Praxis kommt gewöhnlich der Fall vor, wie er auf S. 459 erwähnt worden ist. Man verfährt dann so, dass man vor oder nach den Lichtmessungen mit der Zelle die gefundenen *Relativwerte* mit Hilfe der Thermosäule auf *absolute Werte* umrechnet. Hierzu ist nötig, dass man die verwandten Lichtquellen in gleichem Abstand einmal mit der Photozelle, das andere Mal mit der hinter der $CuSO_4$-Küvette stehenden Thermosäule misst. Man erhält so den Empfindlichkeitsfaktor $\frac{p.a}{p'} \frac{\text{Erg (Ths)}}{\text{(Phz)}}$, mit dem die *Relativwerte* zur Umwandlung in absolute Werte multipliziert werden. Erforderlich ist dabei, dass sowohl bei den *Relativmessungen* als auch den *Kontrollmessungen* die *Strahlung spektral genau gleich* bleibt, d.h. in beiden Fällen müssen z.B. Glühlampen mit genau der gleichen Stromstärke gebrannt werden, etwa verwandte Filter dürfen das eine Mal nicht einfach weggelassen werden usw. [1])

---

in eine graphische Darstellung ein. Alsdann gibt das Verhältnis: $\frac{\text{Fläche J}}{\text{Fläche J/E}}$ die *Allgemeinempfindlichkeit* der Photozelle für den von der Energiekurve erfassten Teil der Gesamtstrahlung der Lichtquelle an, womit die gemessenen Galvanometer-Skalenteile zu multiplizieren sind, um Erg-Werte zu erlangen.

[1]) Das $CuSO_4$-Filter macht dabei insofern eine Ausnahme, als es bei den Kontrollmessungen *stets* in den Strahlengang eingeschaltet sein soll, um die ultrarote Strahlung von der Thermosäule fernzuhalten. Wenn man es bei den *Relativmessungen* mit der Photozelle gewöhnlich unbedenklich fortlassen kann, so ist das dadurch begründet, dass 1. die Photozelle auf Ultrarot und dunkles Rot nicht anspricht, 2. das sichtbare Spektrum bis auf den ganz kurzwelligen Teil nahezu völlig durchgelassen wird, und überdies die Absorptionskurve des Filters einigermassen parallel mit der Empfindlichkeitskurve der Kalium-Argon-Zelle verläuft (vgl. Fig. 6, III und Fig. 9), sodass sich die hierbei gemachten Fehler in erlaubten Grenzen halten. Wohl muss man aber die Reflexionsverluste in Höhe von ca 10 % in Anrechnung bringen, wenn man abwechselnd mit und ohne $CuSO_4$-Filter misst.

Spektral verschiedenartige Lichtquellen lassen sich *nicht* mit der Photozelle — ebensowenig wie mit dem menschlichen Auge — untereinander *auf der Basis des absoluten Maszsystems* vergleichen, darum kann eine Messung des spektral sehr wechselnden Tageslichtes mit Hilfe der Zellenmethode immer nur *Relativ-* aber keine *absoluten Werte* liefern.

Im einzelnen ist die Energiemessung mittels der Photozelle etwas subtiler als mittels der Thermosäule, da dabei auf verschiedene Punkte acht gegeben werden muss (vgl. dazu H. Geitel, 1921). Vor allem ist es nötig, dass während der Messung die an die Zelle gelegte Hilfsspannung genau konstant gehalten wird, da die für spektrale Messungen allein brauchbare Argon-gefüllte Zelle (es sei denn, man kann besonders empfindliche Galvanometer verwenden, die auch den Gebrauch hochevakuierter Zellen gestatten,) gegen Spannungsschwankungen sehr empfindlich ist. Wir verwenden zur Spannungskontrolle [1]) das dem lichtelektrischen Photometer nach

TAB. 10.

Eichungsprotokoll der Kalium-Argon-Photozelle (G. & T. Nr. 5719).

1. Lichtquelle: Osram-Kinox-Nitralampe 6 V, 4.35 Amp.

2. Monochromator: Spaltbreite: Eintrittssp. = 2,5p
Austrittssp. = 1,5p. Bei dieser

Spaltbreite *durchgelassener Spektralbezirk:* λ = 578 μμ (Gelb) ca 23 μμ
λ = 546 μμ (Grün) ca 19 μμ
λ = 436 μμ (Blau) ca 9 μμ

Stellung der Objektive: λ = 660—630 μμ = 1 mm nach aussen, Objektivskala.
620—500 μμ = Omm Objektivskala.
492—450 μμ = 1mm nach innen, Objektivskala.
440—415 μμ = 2 mm nach innen, Objektivskala.
410—400 μμ = 2,5 mm nach innen, Objektivskala.

3. Photozelle: Angelegte Spannung: + 80 p des Elektrometers = 152,5 V.
Blende: 26,2 qmm.

[1]) Diese wird bei *jeder* Messung mit Photozelle *während* der Ablesung des Galvanometers durchgeführt, wobei nötigenfalls das Potentiometer (siehe im folgenden) reguliert wird.

4. *Mikrothermosäule* und Empfindlichkeit: 1p = 2,19 Erg/sec. *Schleifengalvanometer:* (Galvanometer: 640 × Vergrösserung, labile Lage.
5. *Eichungsdaten:*

Wellenlängen in $\mu\mu$	Nitralampe, Energie in Erg/sec mit Thermosäule gemessen	Photozelle: Mittelwert für 1 Galv. p. in Erg/sec	Photozelle: Relative Empfindlichkeit, wenn λ 436 $\mu\mu$ = 1 ist.
660	300	—	—
640	260	—	—
630	243	3400	—
620	225	2300	—
600	192	900	—
590	176	570	—
578 [1]	160	*340*	*0,0065*
560	133	153	—
546 [1]	113	*83*	*0,0265*
540	105	64	—
530	92	41	—
520	79	26	—
510	66	17	—
500	55	11	—
492	47	*7,6*	*0,29*
480	36	4,5	—
470	28	2,9	—
460	21	2	—
450	16	1,7	—
440	12	1,85	—
436 [1]	11	*2,2*	*1*
430	9	2,75	—
425	7,6	3,3	—
420	6,4	3,9	—
415	5,3	4,7	—
410	4,3	5,5	—
405 [1]	3,5	*6,4*	*0,34*
400	2,6	7,3	—
366	Hg-Lampe als Lichtquelle mit Filter UG2 (3 mm) + GG12 (½ mm) + 5 cm H_2O.	*13,8*	*0,13*

[1]) Neben der Nitralampe auch die Hg-Lampe als Lichtquelle benutzt.

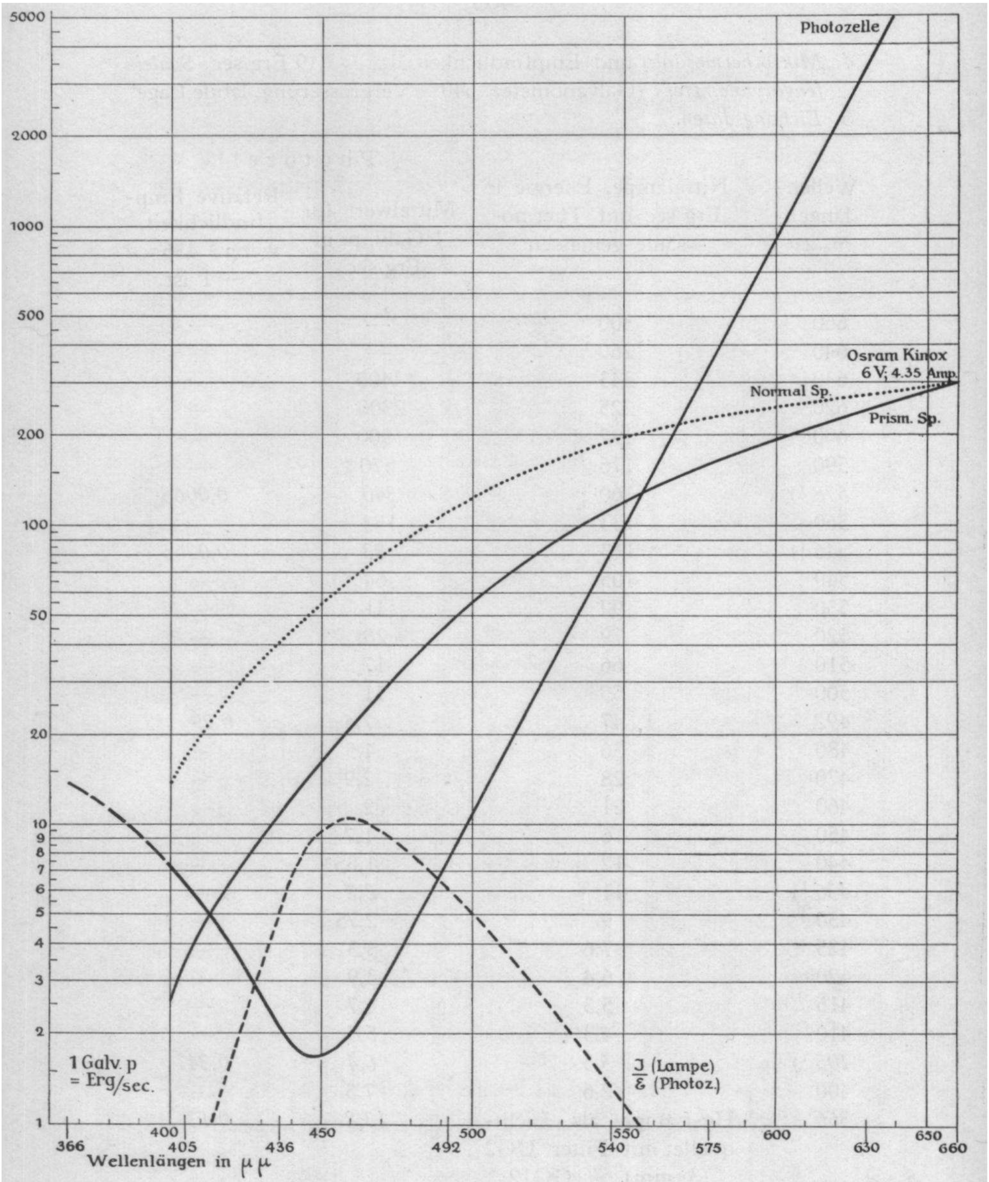


Fig. 9. Spektrale Empfindlichkeit der Kalium-Argon-Photozelle (G. & T. Nr. 5719) und *relative* spektrale Intensitätsverteilung einer Niedervolt-Nitralampe. (Hilfsspannung der Photozelle = 152,5 Volt, Galvanometerempfindlichkeit : 1 p = 1,08.10—/ Amp.).

Elster, Geitel und Dorno beigegebene Einfadenelektrometer. (E in Fig. 8), während die Hilfsspannung einem Potentiometer das der grösseren Spannungskonstanz halber mit einem für seinen Stromverbrauch passenden Eisenwiderstand versehen ist, entnommen wird (P in Fig. 8). Als Schutz vor zu hohen Stromstärken bei etwa auftretenden leuchtenden Entladungen dient ein zwischengeschalteter Widerstand von 10000 Ohm. Um diese bei gasgefüllten Zellen möglichen leuchtenden Entladungen zu vermeiden, welche bei zu hohen Lichtintensitäten bzw. zu hohen Hilfsspannungen auftreten können und die Empfindlichkeit der Zelle beeinträchtigen, ist es gut, wenn man bei Strahlungsmessungen die Zellen anfänglich mit möglichst kleinen Blenden versieht, welche erst dann vergrössert werden, wenn die Zellenempfindlichkeit zu gering sein sollte. Diese Massnahme ist auch deshalb vorteilhaft, weil dadurch das zu messende Licht mehr auf die gleiche Stelle des Kaliumbelags auffällt. Bei manchen Photozellen variert nämlich die Stärke des Photostromes etwas, wenn ein schmales Lichtbündel die lichtempfindliche Fläche an verschiedenen Stellen trifft.

Es ist gut, die Zelle nur *kurz* der zu messenden Strahlung auszusetzen, um grössere Erwärmung des Kaliumbelages zu vermeiden. Auch bei den *Thermosäulen ist kurze Exposition* vorteilhaft, wenn man einwandfreie Messungen machen will, und daher ist es von Belang, dass die Säulen nach dem System Moll bereits nach 2 Sek. Bestrahlung im Temperaturgleichgewicht sind (= Einstellzeit).

Bei den Photozellen ist ferner auf eine gut isolierende Drahtverbindung (z.B. 2-aderiges Gummikabel) zu sehen, da die sehr schwachen aber relativ hoch gespannten Photoströme durch schlechte Isolation sehr gestört werden. Bei der Thermosäule ist wiederum wegen der niedrigen Stromspannung mehr darauf zu achten, dass die Zuleitungsdrähte zum Galvanometer gut verdrillt sind, um magnetische Störungen zu vermeiden. Im übrigen sei hinsichtlich der Technik der Strahlungsmessungen auf die betreffenden Lehrbücher verwiesen, das Arbeiten mit Photozellen behandeln u.a. H. Geitel (1921), C. Dorno (1924 u. 1926/7) und V. E. Shelford (1929).

5. Die kinematographische Registrierapparatur, mit der das Wachstum gemessen wird.

Zur Registrierung des Wachstums der Versuchspflanzen bzw. der phototropischen Bewegungen benutzen wir aus-

schliesslich die kinematographische Registriermethode. Die dafür benötigte Apparatur besteht aus 5 Teilen:

1. Die Filmbeleuchtungseinrichtung.
2. Die Filmaufnahme-einrichtung (Kinoapparat).
3. Die Klinostatenapparatur.
4. Die Projektionslaterne zur Vergrösserung der Filme.
5. Das Messrädchen mit der elektrischen Zählmaschine.

A. DIE FILMBELEUCHTUNGSEINRICHTUNG.

Die Beleuchtung der Versuchspflanzen für die kinematographische Aufnahme kann entweder mit *auffallendem Licht* geschehen, oder es wird nach dem Prinzip von Buder (1926) die kinematographische *Schattenbildregistrierung* durchgeführt.

Die *Registrierung mit auffallendem Licht* hat folgende Vorteile:

1. Der Diffusionslichthof auf den Filmbildchen, der bei starker Vergrösserung (100 ×) die Bildschärfe und damit die Genauigkeit der Registrierung beeinträchtigt, kann vermieden werden, da nicht gegen die Lichtquelle selbst photographiert wird.

2. Mit Hilfe der nachstehend beschriebenen Registrierlampen (S. 467) kann das Licht bequemer als bei durchfallender Beleuchtung eingestellt werden, da bei dieser stets Registrierlampe, Objekt und photographisches Objektiv in einer optischen Achse liegen müssen, um ein gleichmässig beleuchtetes Bildfeld zu bekommen.

3. Die mit auffallendem Licht gemachten Filme lassen sich angenehmer ausmessen, weil das Objekt dunkel auf hellem Grund erscheint, während bei Schattenbildregistrierung umgekehrt das Objekt hell auf dunklem Grunde wiedergegeben wird. Hierbei wird das dunkel adaptierte Auge durch die hellen Konturen des Objektes etwas geblendet, was im ersten Fall nicht geschieht, da dort das Auge infolge des grossen hellen Projektionshintergrundes hell adaptiert ist.

Andererseits hat die *Registrierung mit auffallendem Licht* folgende *Nachteile*:

1. Es werden relativ grosse Lichtmengen benötigt, um einen gut belichteten Film zu erzielen, während bei Schattenbildregistrierung schon sehr schwaches Licht gut geschwärzte Negative ergibt.

2. Es macht zuweilen Schwierigkeiten, die auf die Pflanzen gesetzten Marken (siehe im folgenden S. 485) so zu beleuchten, dass sie sich später auf dem Film scharf und deutlich von dem Hintergrunde abheben.

Aus dieser Aufzählung ist ersichtlich, dass im allgemeinen die Registrierung mit auffallendem Licht den Vorzug verdient, in bestimmten Fällen jedoch besser die Registrierung mit durchfallendem Licht angewendet wird.

Zur Registrierung mit auffallendem Licht befinden sich an beiden Seiten und über der Oeffnung der Versuchskammer, durch die das Kinoobjektiv schaut, (vgl. Fig. 10 u. Fig. 5, I) 3 Registrierlampen, deren Konstruktion Fig. 11 zeigt.[1]) Jede Lampe enthält eine Osram-Nitralampe von 24 Volt, 1,35 Amp. (Type, wie sie bei den optisch medizinischen Augen-Untersuchungsinstrumenten von Zeiss, Jena gebraucht wird.), ferner ein abnehmbares Glasfilter sowie einen normalen grossen Plan- und Hohl-Mikroskopspiegel. Mit diesem beweglich angebrachten Spiegel wird das Licht auf die Versuchsobjekte eingestellt. Die Lichtstärke der 3 Lampen kann mit Hilfe zweier Gleitwiderstände (vgl. Schaltungsschema Fig. 4, II) variiert werden.

Zur Registrierung mit durchfallenden Licht dient eine Registrierlaterne (Fig. 3), die auf dem Klinostatentopfhalter in Richtung der Kino-Arbeitsachse befestigt ist. Sie enthält eine verstellbare Osram-Nitralampe 24 V., 1,35 Amp., deren Licht durch einen Doppelkondensor von 103 mm ø (Hugo Meyer, Görlitz) auf das Kino-objektiv konzentriert wird (vgl. Buder, 1926). Auf den Kondensor kann lichtdicht ein Glasfilter gesetzt werden.

Die Nitralampe in der Registrierlaterne muss zur Hälfte fein mattiert sein, was man in einem kleinen Porzellanmörser mit Amaryll, feinste Körnung, und Wasser vornimmt. Diese Mattierung ist not-

---

[1]) Es empfiehlt sich, die Lampen, die bei längerer Brenndauer etwas warm werden, ausserhalb der eigentlichen Versuchskammer anzubringen und das Licht durch passende, mit Filtern versehene Oeffnungen in den Versuchsthermostaten treten zu lassen. In der schematischen Figur 10 wurde die Zwischenwand mit den Oeffnungen der Deutlichkeit halber nicht mit eingezeichnet.

wendig, weil man sonst Mühe hat, das Mattscheibenbild des Kinoapparates gleichmässig zu erleuchten.

Mit allen anderen Glühlampenarten, vorgeschalteten Mattscheiben usw. konnten wir nicht so gute Resultate erzielen als wie mit der eben beschriebenen Anordnung.

Auch die Lichtstärke der Laterne für durchfallende Registrierbelichtung kann mit einem Schiebewiderstand (vgl. Fig. 4, II) verändert werden.

Als *Lichtfilter*, die vor die Registrierlampen gesetzt werden, dienen uns die Schottfiltergläser RG1 (2 mm), RG2 (1½—2 mm) und RG5 (1½—2 mm). Das Filter RG1 gibt die hellste Rotbeleuchtung, praktisch bis $\lambda =$ 600 $\mu\mu$ reichend, bei Filter RG2 reicht das Rot bis etwa $\lambda = 630\ \mu\mu$, bei Filter RG5 nur bis λ 660—675 $\mu\mu$. Die Auswahl unter diesen 3 Filtern wird durch die Art der Versuchsobjekte bestimmt, je nachdem diese mehr oder weniger für Rot empfindlich sind, und unter Umständen ist dabei nur eine Kompromisslösung möglich. In den weitaus meisten Fällen, z.B. bei Avenakoleoptilen als Versuchspflanzen, kann das Glas RG1 oder höchstens RG2 Verwendung finden, während vielleicht für Phycomyces-Sporangienträger, in Betracht auf die Angaben Blaauws (1909, S. 72, S. 78) über deren erhebliche Rotempfindlichkeit, besser das Filter RG5 benutzt wird.

Es ist praktisch, nach Möglichkeit mit dem hellsten Filter zu arbeiten, da man dann

1. das Objektiv des Kinoapparates ohne weiteres auf 1 : 12 — 1 : 15 abblenden kann (siehe im folgenden S. 471) und trotzdem gut belichtete Negative erhält.

2. die Lampen mit Hilfe der Regulierwiderstände auf schwächere Intensität einstellen kann, wodurch die Wärmeerzeugung sehr verringert wird (sie brennen sowieso infolge der automatischen Klinostatenschaltung nur so lange, als bei jeder Aufnahme unbedingt erforderlich ist!).

3. etwaige erforderliche subjektive Beobachtungen bedeutend erleichtert werden, da die Empfindlichkeit des Auges von 660 $\mu\mu$ — 600 $\mu\mu$ um etwa das 10 fache zunimmt.

Der Vorschlag von Bergann (1930, S. 672), die Registrierlampen mit einem $CuSO_4$-Filter zu versehen, um die eventuell schädlich wirkende Wärmestrahlung fernzuhalten, ist beim kinematographischen Registrieren nicht angebracht, weil dadurch das Rot so geschwächt wird (vgl. Tab. 1, S. 437), dass zur Erzielung gut belichteter Filme längere Beleuchtung oder stärkere Lichtintensitäten notwendig werden, beides Faktoren, die die günstige Wirkung der $CuSO_4$-Lösung wieder

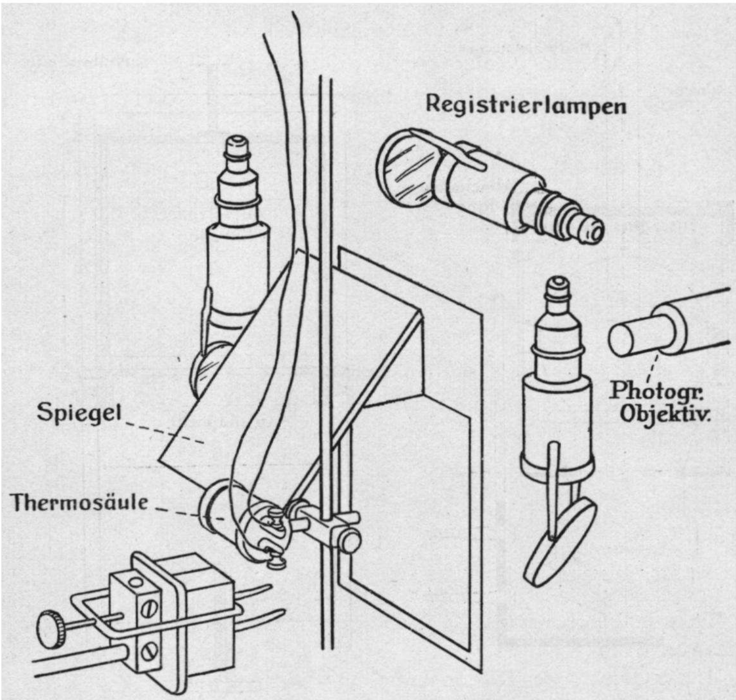


Fig. 10. Anordnung der Lampen für auffallende Registrierbeleuchtung, des abnehmbaren Spiegels für Kinematographie bei horizontalem Klinostatieren und des Topfhalters.

kompensieren. Eher kann man ein Wasserfilter verwenden, aber nötig ist u.E. nach diese Masznahme bei der kinematographischen Registrierung nicht. Wir registrierten z.B. ohne H_2O-Filter mit Erfolg während vieler Stunden lang das Wachstum von Lepidium-Wurzeln (vgl. S. 506), also sehr empfindlichen Objekten, die ohne Glasschutz direkt vom Licht bestrahlt wurden. Dabei entwickelten sich die Wurzelhaare

völlig normal, von irgendeiner schädlichen Wärmewirkung war also nicht die Rede.

Wenn man meint, besonders vorsichtig sein zu müssen, so registriere man mit durchfallendem Licht, da dann die für ein gut belichtetes Negativ erforderliche Lichtmenge so gering ist, dass *subjektiv*

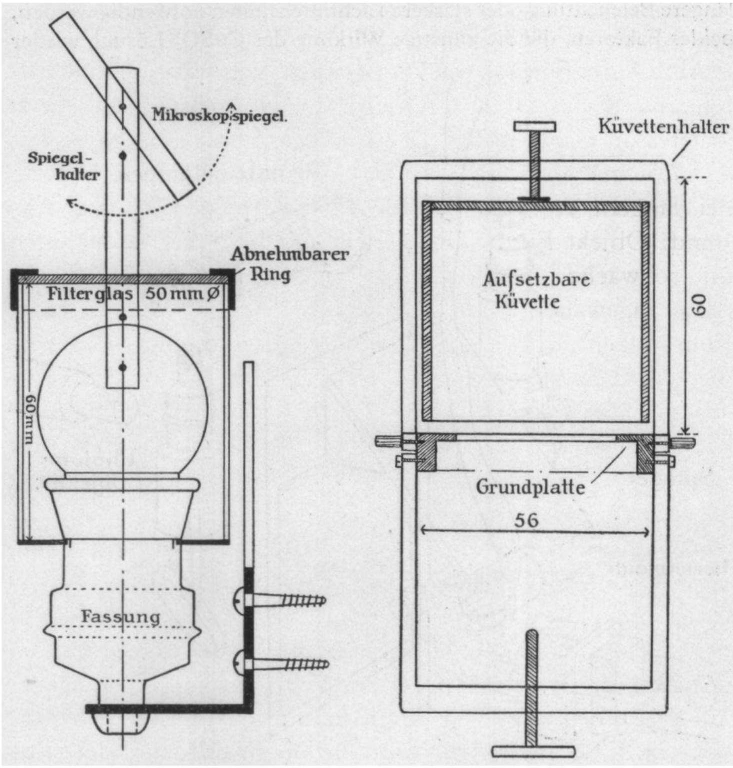


Fig. 11. Schematische Konstruktion der Registrierlampen für auffallende Beleuchtung (links) und der Topfklammer mit aufsetzbarer Küvette (rechts).

keine Beobachtungen mehr dabei gemacht werden können (vgl. dazu auch Buder, 1926). Infolgedessen wird auch die Wärmewirkung der Lichtquelle auf ein Minimum herabgesetzt.

In allen Fällen ist es jedoch von Vorteil, das Registrierlicht nicht länger und stärker als unbedingt notwendig

brennen zu lassen. Dass im übrigen unsere Registrierbeleuchtung keinen messbaren Einfluss auf das Wachstum unserer Versuchsobjekte ausübt, wird im folgenden auf S. 505 ff näher erläutert werden.

B. DIE FILMAUFNAHMEEINRICHTUNG (KINOAPPARAT).

Als Aufnahmeapparat verwenden wir den Universal-Kinamo (Zeiss-Ikon, Dresden) für Normalfilm mit Zeiss Teletessar (1 : 6,3; f = 12 cm) oder Zeiss Tessar (1 : 4,5; f = 7,5 cm) als Objektiv. Das *Teletessar* hat den Vorteil, bei langem Abstand: Objekt-Objektiv einen kurzen Abstand: Objekt-Film aufzuweisen und wird bei Aufnahmen mit schwacher Vergrösserung bis sehr geringer Verkleinerung angewandt. Man vermeidet so lange Auszüge oder Rohrstutzen an der Kamera, die bei Betätigung des Kinomechanismus durch Erschütterungen Unschärfen der Bilder verursachen können.

Das *normale Tessar* gebrauchen wir bei Aufnahmen mit Verkleinerungen von 1 : 2 und mehr, es gewährt dann gegenüber dem langbrennweitigen Teletessar den Vorzug, einen kleineren Abstand: Objekt-Objektiv zu haben. Völlig ideal sind beide Objektive nicht für unsere Zwecke, da das Optimum ihrer Korrektion bei starken Verkleinerungen liegt [1]), während andererseits die Reproduktionsobjektive, die die beste Korrektion bei der Verkleinerung 1 : 1 haben, nur in Brennweiten von 24 cm ab und maximalen Lichtstärken von F : 9 hergestellt werden. Die Wahl des Teletessars (f = 12 cm) und des Tessars (f = 7,5 cm) ist daher ein Kompromiss, der sowohl mit nicht zu hohen Anschaffungskosten als auch Handlichkeit der Aufnahmeapparatur rechnet.

Wegen der nicht optimalen Korrektion bei den gewöhn-

[1]) Nach gütiger Mitteilung der Fa. Zeiss beginnen die Korrektionsfehler der normalen Tessare und Teletessare von Maszstab 1 : 5 an merklich zu werden und sind maximal bei Maszstab 1 : 1.

lich von uns gebrauchten Abbildungsmaszstäben ist es ratsam, mit engerer Blende, etwa 1 : 12, zu arbeiten, wodurch die Korrektionsmängel wieder praktisch aufgehoben werden.

Wir können unseren Kinamo in *senkrechter* oder *wagerechter Lage* verwenden, je nachdem, ob das Bildfeld mehr in die Höhe oder mehr in die Breite ausgedehnt sein soll. Die Aufstellung des Apparates in beiden Lagen geschieht mittels des von Zeiss-Ikon hergestellten verstellbaren Untersatzes und eines kleinen aparten T-Stückes dazu, an dem auch die biegsame Welle befestigt ist, durch die vom Klinostaten aus der Kinamo angetrieben wird (Fig. 3). Für *Registrieraufnahmen* ist dabei die biegsame Welle an die „Eineracbse" des Kinamo angeschlossen. Notwendig ist eine *äusserst stabile Aufstellung des Apparates*, um jede Erschütterung während der Aufnahme von dem Kinamo fernzuhalten. Zu diesem Zweck hat bei unserer Aufstellung auch das Objektiv, das vermittels verschieden langer Rohrstutzen und der Bajonettfassung des Kinamos in die für die verschiedenen Abbildungsmaszstäbe notwendigen Abstände vom Film gebracht werden kann, eine kleine bewegliche Extrastütze, die hauptsächlich bei „langem Auszug" vorteilhaft ist. Die Bildgrösse der Objekte auf dem Film wird durch Photographieren der mit Millimetereinteilung versehenen „Beweglichen Skala", an deren Stelle nachher bei der eigentlichen Aufnahme das Objekt zu stehen kommt, festgestellt (siehe S. 474).

Normalerweise erfolgt die Filmaufnahme in *Zenith-Stellung der Versuchspflanze*. Diese bedingt bei Klinostatenversuchen eine Rotation *senkrecht* zur horizontalen Klinostatenachse. Die Methode hat den Vorteil, dass eine etwaige Beleuchtung der Pflanze ohne Umstände und ohne gleichzeitige geotropische Reizung einfach dann vorgenommen werden kann, wenn nach Rotation der Klinostatenachse das Versuchsobjekt gerade wieder in die Zenithlage gekom-

men ist, nachdem es vorher bereits in Nadirlage zwecks Kompensation der geotropischen Reizung intermittierend verweilt hatte.

Unsere Apparatur gestattet aber auch die Filmregistrierung während Klinostatenversuchen, wo die *Rotation parallel zur Klinostatenachse* vorgenommen wird. Hierfür dient die in Fig. 10 sichtbare Spiegeleinrichtung, mit deren Hilfe das Bild der horizontal liegenden Versuchspflanze in den wie immer wagerecht stehenden Kinoapparat geworfen wird. Diese Einrichtung mit einem im Winkel von genau 45° zur Senkrechten stehenden, an der Oberfläche versilberten Epidiaskopspiegel von Zeiss-Jena ist leicht abnehmbar an der Vorderwand der Versuchskammer angebracht, die dem Kinamo zugewandt ist und gleichzeitig die 3 Registrierlampen für auffallende Beleuchtung trägt. Der eigentliche Spiegel ruht dabei leicht entfernbar und justierbar in einem Rahmen, der im Winkel von 45° von der Wand der Versuchskammer absteht. Unterhalb des Spiegels befindet sich noch ein kleines verstellbares Visier, mit dessen Hilfe das Versuchsobjekt unter Anwendung des „verstellbaren Kreuzstückes" (vgl. S. 475) genau in die Horizontalebene gebracht werden kann, in der es scharf photographiert wird. Da das Tischchen, auf dem die Versuchspflanze festgeschraubt wird, schnell senkrecht und wagerecht an das Kreuzstück angesetzt werden kann, so kann die Umstellung der Versuchspflanze ohne überflüssige Bewegungen erfolgen, und es ist möglich, binnen weniger als einer Minute von der kinematographischen Registrierung bei Rotation *senkrecht* zur Klinostantenachse zur Registrierung bei Rotation *parallel* zur horizontalen Klinostatenachse überzugehen, wobei scharfe Objektabbildung auf dem Film stets gewährleistet ist.

Bemerkt sei, dass die Registrierung bei Rotation parallel zur horizontalen Klinostatenachse nur mit auffallender Beleuchtung vorgenommen werden kann, wobei das Licht der 3 Laternen durch

Drehen der an ihnen angebrachten Spiegel auf die Pflanzen gerichtet wird.

(Der Universalkinamo und die Einrichtung für durchfallende Registrierbeleuchtung gestatten es übrigens, Filmnegative automatisch auf Positivfilm zu kopieren. Man benötigt dabei eine Kopierkassette und ersetzt das Rotfilter der Registrierlampe durch eine feine Mattscheibe. Den Antrieb des Kinamos bewirkt der Klinostat).

Ba. HILFSMITTEL ZUR EXAKTEN EINSTELLUNG DER VERSUCHSPFLANZEN (BEWEGLICHE SKALA UND TOPFHALTER).

Um die Versuchspflanzen in diejenige Lage zu bringen, in der sie nach Wunsch beleuchtet werden, andererseits sich aber auch scharf eingestellt im Bildfeld des Kinamos befinden, sind 2 Vorrichtungen notwendig, 1. die Bewegliche Skala, an deren Hand die Einstellung vorgenommen wird, 2. der Topfhalter mit dem verschiebbaren Kreuzstück, mit dessen Hilfe die Pflanzen justiert werden.

Die *Bewegliche Skala* (Fig. 3), ein kleines Stück rechtwinklig gebogenes und mit Paraffin zum Durchsichtigmachen getränktes Karton-Millimeterpapier, ist mittels eines Stabes an einem sog. Objektführer (Kreuztisch-Ersatz bei einfachen Mikroskopen!) angebracht. Dieser Objektführer ist wiederum an einem dickeren Stab verschiebbar befestigt. Es ist so möglich, die Bewegliche Skala in verschiedene, genau ablesbare Positionen zu bringen, sodass mit ihrer Hilfe die Versuchspflanze leicht in die für Belichtung und Photographie erforderliche Stellung gebracht werden kann. Dabei wird die eine Seite des Millimeterpapiers zur Einstellung in den Bildfeldausschnitt des Kinoapparates, die andere Seite aber zur Einstellung in die „Schärfenebene" des Kinoobjektives und gleichzeitig zur Einstellung in das Spaltbild des nachher beleuchtenden Lichtbündels gebraucht (siehe auch S. 457). Die *seitliche* Bildfeldbegrenzung wird durch 2 kleine verschiebbare Blechpfeile definiert, die auf dem Haltestab (Fig. 3) bzw. einem Hilfsstab an der Beweglichen Skala angebracht sind.

Arbeitet man mit sehr kleinen Spaltbildern, z.B. solchen von weniger als 1 mm Länge oder Breite, so ist die Einstellung mit Hilfe der beweglichen Skala nicht genau genug. Wir helfen uns dann so, dass unmittelbar vor Beginn der eigentlichen Belichtung die Pflanze auf ein *rot-orange leuchtendes Spaltbild* eingestellt wird, wobei mit einem Horizontalmikroskop oder einem Zeisschen Feldstecher mit Vorsatzlinse („Fernrohrlupe"), die sich in der achsialen Verlängerung des beleuchtenden Lichtbündels befinden, kontrolliert wird. Dient die Hg-Lampe als Lichtquelle, so wird mit Hilfe des Filters RG1 (2 mm) (siehe S. 438) ein für die Einstellung genügend intensives orangefarbiges Licht von etwa 615 $\mu\mu$ Wellenlänge gewonnen, arbeitet man mit einer Glühlampe oder Bogenlampe, so schaltet man besser das Filter RG2 (1—2 mm) in den Strahlengang, da in diesem Fall das von RG1 durchgelassene Licht ein wenig zu stark und phototropisch nicht einwandfrei sein könnte.

Der *Topfhalter mit dem verschiebbaren Kreuzstück, der auch* die Registrierlaterne für durchfallende Beleuchtung trägt [1]), ist in Fig. 3 sichtbar. Man sieht, dass die von dem Vorgelege des Klinostaten unten heraufkommende Achse (siehe S. 477) mit einer Nute und einer in einer Hülse befindlichen Nocke verschiebbar an dem Topfhalter angebracht ist und dort eine Kegelradübersetzung antreibt. Der eigentliche Topfhalter (meist ein kleines Tischchen wie in Fig. 3 und 10,) hat ein *verstellbares Kreuzstück* als Verbindung mit der horizontalen Achse der ganzen Vorrichtung. Ferner sitzt auf dieser Achse noch eine Bandbremse, mit deren Hilfe der tote Gang des Klinostaten, der sich bei einseitigem Uebergewicht der drehenden Masse (Kreuzstück nebst Tischchen und Pflanze) störend bemerkbar machen würde, beseitigt wird.

---

[1]) Von F. & M. Lautenschläger, G.m.b.H., München, Lindwurmstr. 29—31, geliefert.

Das Kreuzstück gestattet eine beliebige Bewegung der auf dem Tischchen sitzenden Pflanze in der Bildfeldebene des Kinamo, wogegen die Einstellung des Versuchsobjektes in die „Schärfenebene" des Kinoobjektives mit der Hand durch Verschieben auf dem Tischchen geschieht.

Die Töpfchen, mit denen wir meistens (bei Avena als Versuchsobjekten) arbeiten, sind rechteckige Zinkgefässe von 2 × 4,5 × 4,5 cm Grösse, auf die eine Blechmanschette gesetzt werden kann, die sie um 1 cm höher macht. Diese nimmt man bei den eigentlichen Versuchen wieder ab, sodass dann die Pflanzen bis fast an die Wurzeln frei gelegt werden können (vgl. H. G. du Buy u. E. Nuernbergk, 1929, II). Es ist möglich, von diesen Töpfchen mehrere nebeneinander (Fig. 10) auf dem Tischchen mit Hilfe einer Klammer festzumachen, wobei eventuell das Tischchen mittels eines anschraubbaren Blechstückes vergrössert wird. Ausserdem ist neben einer Einrichtung zum Rotieren von Petrischalen eine besonders konstruierte Klammer vorhanden (Fig. 11), die oben eine kleine rechteckige Küvette aus planparallelem Glas trägt, wenn die Versuchspflanzen in besonders feuchter Atmosphäre wachsen sollen. Auch diese „Küvettenklammer" ist klinostatierbar, ausserdem kann die Küvette nach Wunsch in einem Augenblick entfernt werden.

Ueber die Möglichkeit, das Tischchen an dem verstellbaren Kreuztisch so zu befestigen, dass die Versuchsobjekte parallel zur horizontalen Klinostatenachse gedreht werden, siehe S. 473.

C. DIE KLINOSTATENAPPARATUR.

Der *Universal-Klinostat nach Nuernbergk* (1929), der andernorts genauer beschrieben worden ist, dient zum Antrieb der ganzen Registriereinrichtung. Er hat dabei folgende 3 Aufgaben zu erfüllen:

1. treibt er den Kinoapparat mittels der biegsamen Welle an.
2. schaltet er die Registrierbeleuchtung ein und aus.
3. besorgt er, wenn notwendig, das Klinostatieren der Ver-

suchspflanzen. Die Aenderung in allen diesen 3 Verrichtungen kann auf die bequemste und schnellste Weise vorgenommen werden, sodass z.B. *während des Betriebes* von der Registrierung ohne Klinostatendrehung zur Registrierung mit intermittierender Rotation, oder von der Registrierung im Zeitabstand 1 zu derjenigen im Zeitabstand 2 übergegangen werden kann usw. usw.. Für die Herstellung exakter Registrierfilme sind diese Variationsmöglichkeiten des Klinostaten sehr wertvoll.

Die Aufstellung des Klinostaten muss möglichst erschütterungsfrei erfolgen, um Unschärfen bei den Filmaufnahmen zu vermeiden. In Tafel VIII, A ist der Klinostat nicht sichtbar, wohl aber rechts unten ein kleines Stück einer grossen Steinplatte, auf der der Motorteil des Klinostaten ruht. Diese Anordnung ist speziell in Utrecht notwendig, weil sich unser Versuchszimmer im 3. Stockwerk des Institutes befindet und elastischen Holzfussboden auf Betonunterlage hat. Die Füsse der Grundplatte des Klinostaten stehen obendrein auf einer kleinen Unterlage weichen Radiergummis. Der *Vorgelegeteil* des Klinostaten (vgl. Nuernbergk 1929) befindet sich unter dem grossen Experimentiertisch auf einer kleinen Fussbank und ist durch eine zweite biegsame Welle mit dem Motorteil verbunden. Von dem Vorgelege führt eine senkrechte Achse zu dem auf S. 475 beschriebenen Topfhalter (Fig. 3).

Wenn Versuchspflanzen klinostatiert werden, so geschieht das meist mit Intermittierungswinkeln von 180°, die Geschwindigkeit der Drehung beträgt 1 Min./pro Umdrehung. Ein Zenithstand der Versuchsobjekte bzw. eine bei Rotation parallel zur horizontalen Achse *entsprechende* Stellung ist dabei erforderlich, weil sonst nicht photographiert werden kann. Im übrigen aber hat man sehr grossen Spielraum darin, alle möglichen weiteren Intermittierungspunkte, die sowohl nach Zeit als auch Winkelstellung variieren können, in eine Rotations- oder Photographier-

periode einzulegen, weil dazu nur die Kontakte an der Steuerscheibe bzw. die Umdrehungszeit dieser Scheibe, die sich auf dem Motorteil befindet verändert werden müssen. Bei H. G. du Buy u. E. Nuernbergk (1930) und imfolgenden auf S. 506 sind davon experimentelle Beispiele gegeben.

Der Antrieb des Kinoapparates arbeitet mit einer Geschwindigkeit von 5, 10 oder 15 Sek./pro Umdrehung, gewöhnlich mit 15 Sek.. In diesem Falle dauert die eigentliche Belichtungszeit eines Filmbildchens 7,5 Sek., da sich während der übrigen Zeit der Sektor der rotierenden Blende vor dem Film befindet. Es hat sich nun als *praktisch* herausgestellt, wenn man die biegsame Welle des Kinoapparates mit der Antriebsachse auf dem Motorteil des Klinostaten so verbindet, dass während der Ruhe der Sektor gerade den Film verdeckt. Einmal ist es so möglich, Licht zur subjektiven Beobachtung der Pflanze anzumachen, ohne befürchten zu müssen, dass der Film durch zu lange Belichtung überschwärzt wird, dann aber ist diese Einstellung der Welle bei Verwendung der Niedervolt-Nitralampen als Registrierlichtquellen *notwendig*, weil die Lampen 1—2 Sekunden brauchen, ehe der Glühkörper richtig glüht. Wird nun der Kinoapparat in Gang gesetzt, so wird automatisch vom Klinostaten auch die Registrierbeleuchtung eingeschaltet, diese braucht etwa 2 Sek., bis sie gut brennt, aber während dieser Zeit läuft erst noch der Sektor vor dem Film vorbei, sodass bei Exposition die Beleuchtung sofort mit voller Stärke einsetzt.

Allzulange Belichtungszeiten der Aufnahmen sind unpraktisch, weil inzwischen die Pflanze nicht nur etwas wächst, sondern auch durch die grösste Gefahr, kleine Erschütterungen, eine Unschärfe in das Negativ hineingetragen werden kann.

Ferner hat die Praxis ergeben, dass es bei jeder Registrieraufnahme von wachsenden Pflanzen von *grösstem Vorteil* ist, wenn man den Kinoapparat von Beginn bis Ende des Versuches stets *gleichmässig* in den gewählten Zeitabständen seine Aufnahme machen lässt und

nicht während einer Belichtung, Dekapitation oder sonst einer Manipulation, deren Wirkung man auf die Pflanze studieren will, das Registrieren unterbricht. Man hat sonst später, besonders wenn man erst nach längerer Zeit die Auswertung und Durchmessung eines „Filmprotokolls" vornehmen will, die grösste Mühe, sich in den Zeitabständen, die bei dem Versuche vorhanden waren, zurecht zu finden, während es oft auf diese sehr ankommt. Darum stets gleichmässig bis zum Ende des Versuches weiterregistrieren, so sind nachher auf dem Filmband die aufeinanderfolgenden Bildchen nicht nur die Protokolle der gerade vorhandenen Form oder Bewegung der Versuchspflanze, sondern auch gleichzeitig — ohne dass man bei Registrierfilmen eine Uhr mit aufnehmen muss —, das mitlaufende Zeitprotokoll. Wir glauben, dass gerade darin einer der Hauptvorzüge der Filmprotokolle gegenüber den subjektiv gemachten Protokollen besteht.

D. DIE PROJEKTIONSLATERNE ZUR VERGRÖSSERUNG DER FILME.

Zu einer *rationellen* Anwendung der Filmregistriermethode gehört eine *bequeme* Vergrösserungsmöglichkeit der Filmbildchen, der ein gewöhnlicher Projektions- oder Kinovorführungsapparat nicht gerecht wird. Wir haben daher die in Tafel VIII, B dargestellte Projektionslaterne konstruiert, welche im wesentlichen aus einer der üblichen Bildstreifenansätze (im vorliegenden Fall Zeiss-Ikon) besteht. Das urpsrünglich darin sitzende Objektiv längerer Brennweite wurde durch ein Trioplanobjektiv (1 : 3; f = 3 cm) von Hugo Meyer, Görlitz ersetzt, das vermittels eines sehr kurzen Tubus und Schneckengetriebes verstellbar ist. Man ist dadurch in der Lage, schon auf 3 m Abstand von der Projektionsfläche eine 100 fache Vergrösserung der Filmnegative vorzunehmen [1]).

Die Lichtquelle der Laterne ist eine verschiebbare Osram- oder Philips-Kino-Lampe, 6 V., 5 Amp. oder 12 V., 8,3 Amp., als Widerstand für diese Glühbirne werden Heizsonnenpatronen verwendet. Da der von Zeiss-Ikon stammende Bildstreifenansatz ursprünglich keinen

[1]) Erhältlich bei Lautenschläger, München, Lindwurmstr.

Kondensor besitzt, so wurde ein kleiner Doppelkondensor von H. Meyer, Görlitz, von 40 mm Linsen ø und 25mm Brennweite eingebaut.

Die Projektionslaterne ist auf einem Dreifuszstativ montiert, bei schwacher Vergrösserung kann dieses auf einen grossen Tisch gesetzt werden, wobei auf die Tischfläche projiziert wird (bis max. 30 fache Vergr.). Hierbei wird der Bildwechsel durch eine dünne biegsame Welle (4mm ø), die an dem einen Ende ein Handrädchen trägt, an dem anderen Ende aber an der einen Filmrolle festgemacht ist, erleichtert.

E. DAS MESSRÄDCHEN MIT DER ELEKTRISCHEN ZÄHLMASCHINE.

Obwohl man mit jedem beliebigen Millimeterrädchen die Filmprotokolle ausmessen kann, ist es doch zweckmässig, hierfür eine besondere Einrichtung zu benutzen, welche die mit dem Messrad abgefahrenen Millimeter und Centimeter automatisch auf einem Zifferblatt anzeigt. In Fig. 12 und 13 ist diese Einrichtung abgebildet, die Herr P. A. de Bouter für uns nach gemeinschaftlichem Entwurf konstruiert hat.

Im einzelnen besteht die Zählmaschine aus 2 Teilen, dem Messrädchen mit Kollektorrad, und der eigentlichen Zählmaschine.

Das Messrad (Fig. 12, II), dessen Umfang genau 10 cm beträgt, ist durch eine Zahnradübertragung im Verhältnis 2 : 1 mit dem *doppelt* so grossen Kollektorrad verbunden. Infolgedessen bewegt sich ein Punkt auf der Peripherie des Kollektorrades genau um 4mm vorwärts, wenn das Messrad 1mm weitergeschoben wird. Auf dem Kollektorrad schleifen 3 Schleifkontakte, 2 auf den beiden, von einander isolierten „Deckeln" des kurz zylinderförmigen Gebildes, einer auf dem durch gegeneinander isolierte Segmente gebildeten „Zylindermantel". Die Segmente sind abwechselnd mit den beiden Seiten des Zylinders leitend verbunden, sodass der Strom von dem Segment-Schleifkontakt einmal zu dem einen, das andere Mal zu dem anderen Seiten-Schleifkontakt läuft. Dadurch werden die beiden Elektromagnete der Zählmaschine abwechselnd erregt und lassen ein kleines Echappement, das auf ein Sperrad wirkt, hin und her schwingen (Fig. 12, III). Die Achse dieses 50 zähnigen Sperrades wird ihrerseits wieder durch ein Uhrwerk eines Junghans-Weckers (Fig.

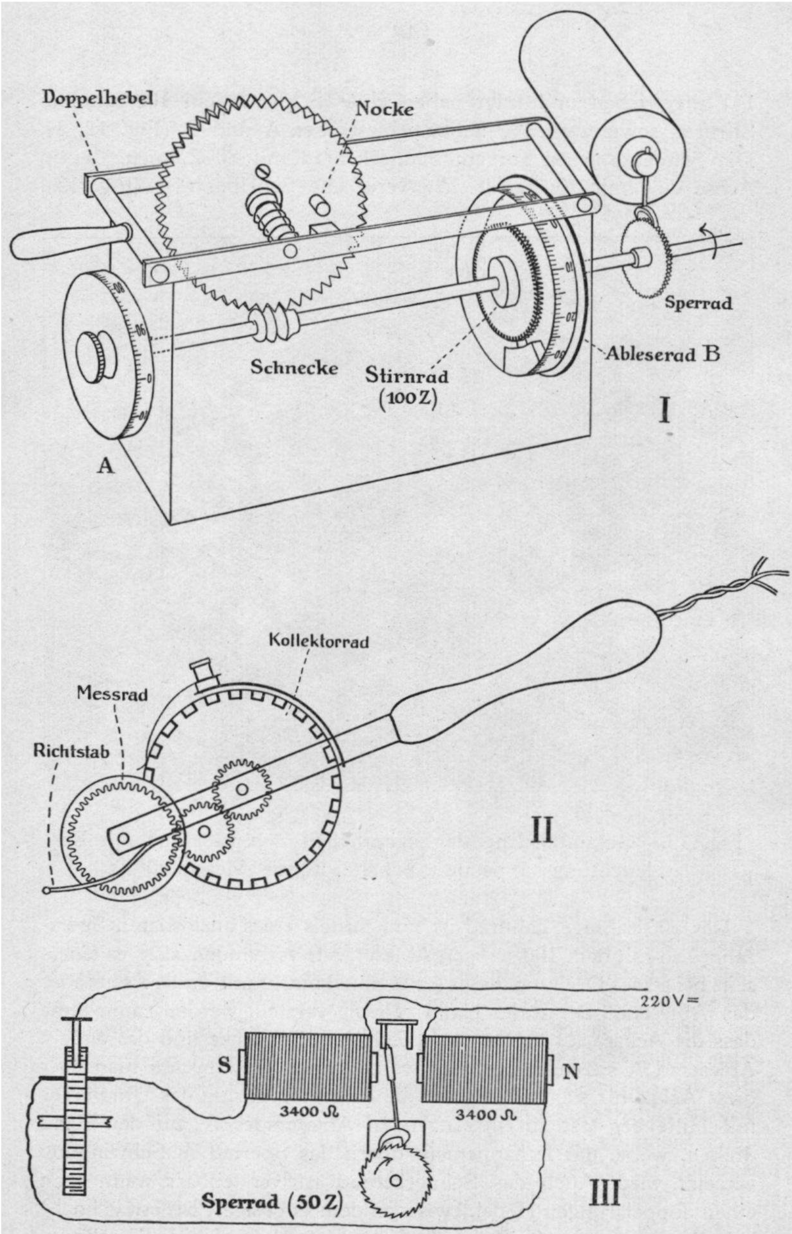


Fig. 12. Schema der Zählmaschine zum Ausmessen der Registrierfilme. (Erklärungen siehe im Text.)

13) angetrieben und trägt neben einer Schnecke ein 100-zähniges Stirnrad sowie zwei 100-teilige Ableseräder A und B (Fig. 12, I). Die Schnecke wirkt auf ein Schneckenrad mit 80 Zähnen, dessen Achse eine mit 80 Teilstrichen versehene Scheibe trägt (Fig. 13).

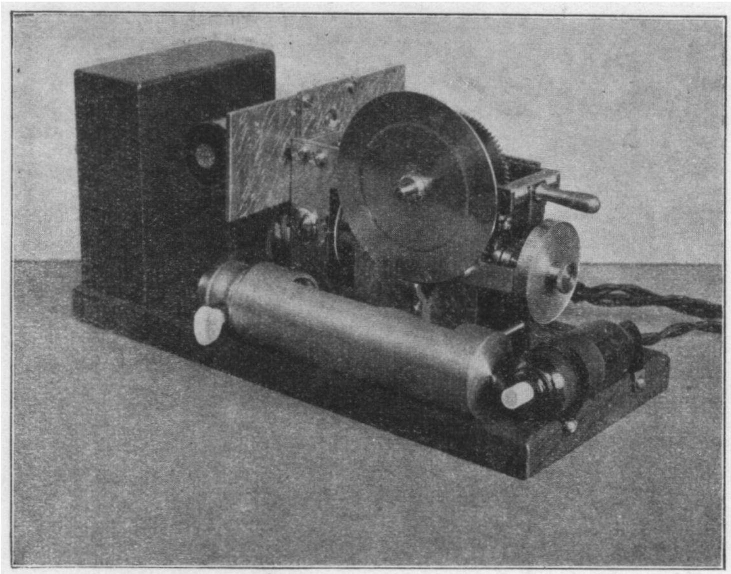


Fig. 13. Gesamtansicht der eigentlichen Zählmaschine mit Beleuchtungslampe und Schalter (ohne Messrad!)

Das 100-zähnige Zahnrad ist nun mittels eines auslösbaren Sperrzahnes so mit dem 100-teiligen Ableserad B verbunden, dass es einerseits bei seiner Drehung dieses Ableserad B mitnimmt, andererseits aber das Ableserad B mit der Hand beliebig verstellt werden kann, ohne dass die Achse, auf der Sperrad, Zahnrad, Schnecke und das andere Ableserad A sitzen, mitgedreht werden muss. Wohl kann man aber diese Achse für sich selbst *gegen* die Antriebsrichtung des Uhrwerkes mit Hilfe des fest auf ihr sitzenden Ableserades A mit der Hand drehen, wobei das Echappement durch das Sperrad in Schwingung versetzt wird. Auch das Schneckenrad ist verstellbar; wenn man einen doppelarmigen Hebel, zwischen dem es gelagert ist, etwas hochhebt, kommt es von der Schnecke frei und wird durch eine Spiralfeder so weit zurückgedreht, bis es mit einer Nocke gegen einen Anschlag

schlägt (Fig. 12, I). Der doppelarmige Hebel trägt noch einen zweiten Anschlag, der auch nur bei Lüftung des Schneckenrades in Wirkung treten kann und dann dafür sorgt, dass bei der Drehung der Sperrad-Achse mit Hilfe des Ableserades A dieses automatisch in seiner O-Stellung aufgehalten wird. Lüftet man also den doppelarmigen Hebel, so wird einerseits das Schneckenrad bzw. die Scheibe durch Federkraft, andererseits das Ableserad A durch Drehen mit der Hand in die O-Stellung gebracht.

Die Wirkungsweise der ganzen Einrichtung ist nun folgende: Fährt man mit dem Messrad bzw. dem ihm vorstehenden Richtstab eine Strecke von 10 cm ab, so macht das Kollektorrad 100 mal Kontakt. Infolgedessen ziehen die Elektromagnete das Echappement 50 mal nach der einen und 50 mal nach der anderen Seite, und so dreht sich das Sperrad einmal herum. Gleichzeitig drehen sich auch beide 100-teiligen Ableseräder einmal herum, während das Schneckenrad mit der Scheibe einen Zahn bzw. einen Teilstrich weiterrückt. Man liest also an der Scheibe 1 Dezimeter ab. Durch Heben des doppelarmigen Hebels kann man die Scheibe wieder auf 0 zurückbringen. Nun will man etwa eine Strecke von 143 mm abfahren. In diesem Falle gibt es 143 Kontakte, und die Magnete ziehen das Echappement 71 mal nach der einen und 72 mal nach der anderen Seite. Infolgedessen dreht sich das Sperrad 71½ Zähne herum (zur Drehung um einen vollen Zahn ist einmaliges Hin- *und* Herschwingen des Echappement erforderlich), und man liest auf der Scheibe 1 Dezimeter, auf den beiden Ableserädern 43 mm ab. Für die nächste Messung kann man nun sowohl beide Ableseräder als auch die Scheibe wieder in der vorhin beschriebenen Weise auf 0 zurückbringen, man kann aber auch die Maschine weiterlaufen lassen und erhält dann Addition der einzelnen Werte. Um diese nun bequem ohne die Mühe einer jedesmaligen Subtraktion zu bestimmen, dreht man nach jeder Einzelbestimmung das *lose* auf der Sperrad-Achse sitzende

Ableserad B mit der Hand auf 0 zurück [1]); dieses beginnt also bei der folgenden Messung die Zählung mit 0, während die Scheibe und das Ableserad A weiterlaufen und die Gesamtaddition besorgen. In dem Falle, dass die Einzelwerte grösser als 1 Dezimeter sind, hat man dabei nur darauf zu achten, wieviel Umläufe das auf 0 zurückgestellte Ableserad B macht, da dieses an und für sich nur bis 100 mm misst. Durch einen summarischen Blick auf den Stand der Scheibe ist dabei ein Irrtum kaum möglich.

Man kann mit unserer Zählmaschine maximal Längen von 7½ m messen, die grösste Geschwindigkeit, mit der man das Messrad fortbewegen kann, beträgt etwa 4—5 cm/sec. Bei noch grösserer Geschwindigkeit arbeitet die Auslösung des Sperrades nicht mehr auf den mm genau.

Der grosse Vorteil der Einrichtung besteht im wesentlichen darin, dass die Messtätigkeit geteilt werden kann; der die Objekt-Umrisse mit dem Messrad Abfahrende hat sein Augenmerk nur auf diesen Vorgang zu richten, braucht keine Zahlen abzulesen [2]) oder gar zu subtrahieren (bei Zonenmessungen notwendig!), während der Ablesende die gemessenen Zahlenwerte direkt der Zählmaschine entnehmen und zu Papier bringen kann, wobei etwa erforderliche Zahlensubtraktionen einfach mechanisch durch Bedienung des „losen" Ableserades B vorgenommen werden. Diese Vorteile fallen um so mehr ins Gewicht, wenn man in einem verdunkelten Raume arbeiten muss, wie das bei der Filmprojektion notwendig ist.

---

[1]) Zur bequemeren O-Einstellung des Ableserades B ist am Gehäuse ein kleiner Anschlag angebracht (Fig. 13) gegen den das Ableserad aber *nur bei ausgelöstem Sperrzahn* (S. 482) mittels einer Nocke anschlägt.

[2]) Dieses ist der „wunde Punkt" bei Anwendung der gewöhnlichen Messhülfen (Lineal oder Millimeterrädchen) zum Zonenmessen, denn gerade beim Ablesen verschiebt sich leicht das Masz, oder man verliert die genaue Lage des Messpunktes.

F. EINIGE BEMERKUNGEN ZUR PRAXIS DER KINEMATOGRAPHISCHEN REGISTRIERMETHODE.

Bei der eben gegebenen Beschreibung der wichtigsten Utensilien, die man für die *verbesserte* kinematographische Registriermethode benötigt, konnte auf einige Punkte nicht hingewiesen werden, welche sonst noch der Beachtung wert sind.

I. *Die Zonenmarkierung der Versuchspflanzen.*

In unseren ersten beiden Publikationen (H. G. du Buy und E. Nuernbergk, 1929, I, II) wurde eine mittels Kohlepartikelchen hergestellte Zonenmarkierung der Versuchspflanzen beschrieben. Diese Methode lässt sich nur bei schwächerer nachheriger Vergrösserung der Filme gebrauchen, da die unregelmässige Form der seitlich an das Objekt mit Hilfe von Paraffinum liquidum gesetzten Partikelchen bei der Ausmessung der Zonen störend ist. Das Gleiche gilt für die bei auffallender Registrierbeleuchtung brauchbare Markierung mittels Tuschestrichen. Auch mit Paraffinöl aufgesetzte Haarstückchen können nicht befriedigen, da man sie nicht direkt seitlich anbringen kann.

Nach vielen Versuchen ergab sich, dass die besten Markierungsmittel feine, mit dem Rasiermesser ausgeschnittene *Papier- oder Stanniolstreifchen* von einer Länge von etwa 1,5 mm und einer Breite von ca 0,4—0,5 mm sind. Diese Streifchen werden bei etwa 0,5 mm der Länge mit einer feinen Pinzette quer gefaltet und mit dem kurzen Querstück mittels einer Spur von Paraffinum liquidum an der Seite der Versuchspflanzen *senkrecht* angeklebt, wo sie, ohne zu verrücken, viele Tage lang haften bleiben und später wieder abgenommen werden können, um bei neuen Versuchspflanzen Verwendung zu finden. Diese Markierung liefert nachher bei der Projektion sehr scharfe Konturen und kann selbst an so empfindlichen Objekten, wie den Sporangienträgern von Phycomyces nitens (vgl. im folgenden S. 512) mit Erfolg verwendet werden.

Arbeitet man mit auffallender Registrierbeleuchtung, so ist Papiermarkierung anzuwenden, wobei solches Papier

die besten Resultate liefert, das trotz der Befeuchtung mit Paraffinöl noch gut *diffus* reflektiert, z.B. dünnstes photographisches Kopierpapier mit Barytunterlage unter der Emulsion, das zuvor ausfixiert wird. Für durchfallende Registrierbeleuchtung nimmt man besser die Stanniolmarkierung.

II. *Das Filmmaterial und seine Entwicklung.*

Als Filmmaterial gebrauchen wir den Agfa- oder Perutzfilm, bei Rotaufnahmen die Sorten mit panchromatischer Sensibilisierung. Diese reicht bei dem Perutzfabrikat nicht so weit in das dunkelste Rot wie bei dem Agfafilm. [1]) Als Entwickler verwenden wir Rodinal oder Perutz-Feinkornentwickler. Das Rodinal wird in 15 facher Verdünnung gebraucht, um starke Kontraste zu erzielen. Der Entwickler arbeitet ökonomisch und kann wiederholt gebraucht werden, wobei ihm jedesmal etwa $^1/_6$—$^1/_7$ frischer Entwickler 1 : 15 zugesetzt und ebenso viel alter Entwickler weggegossen wird. Die Entwicklungszeit beträgt dann ca 10 Minuten, wenn mittels des „Filmentwicklungsgerätes in Spiralform" von Zeiss-Ikon entwickelt wird. Den Perutz-Feinkornentwickler, der nicht ganz so ökonomisch wie der Rodinalentwickler arbeitet, verwenden wir dann, wenn wir *möglichst feines Silberkorn* nötig haben; dieses steigert die Genauigkeit der Ausmessung. Wir lösen eine Patrone in etwa 1300 ccm Wasser auf und entwickeln ca 20 Minuten lang.

Der panchromatische Film, dessen Emulsion leider nicht alle Ansprüche hinsichtlich Feinkörnigkeit erfüllt, kann nur bei dunkelgrünem Licht (Agfa- oder Lifa-Lichtfilter für grüne Dunkelkammerbeleuchtung) verarbeitet werden, es sei denn dass man den Film

[1]) Bis in das Ultrarot hinein ist der R-Film der Agfa empfindlich, meist kommt man aber, wenn man die Glasfilter RG1 oder RG2 benutzt, mit dem normalen panchromatischen Film aus, der überdies für das helle Rot bzw. Orange noch empfindlicher ist.

mit den etwas umständlicher zu handhabenden Desensibilatoren (Pinakryptol) vor der Entwicklung behandelt. Als besonders geeignete Dunkelkammerlampen haben sich die „Siriusdunkelkammerlampen" bewährt, deren Rotfilter auch leicht durch ein Grünfilter vertauscht werden kann.

Da für das Ausmessen kontrastreiche und halbschattenfreie Negative am geeignetsten sind, so ist Belichtung und Entwicklung der Registrierfilme dementsprechend einzurichten.

Es ist gut, den Film nach dem Fixieren zu härten, um ihn gegen mechanische Beschädigungen widerstandsfähiger zu machen. Als Härtebad benutzen wir 20g Chromalaun auf 1000 ccm Wasser, dazu soviel $NaHSO_3$, bis das Bad etwas nach SO_2 riecht. In dieses Bad, das sehr oft benutzt werden kann, ehe es zu erneuern ist, wird der Film nach kurzem Abspülen nach dem Fixieren für 3—4 Minuten gelegt. Alsdann Wässern wie gewöhnlich.

III. *Ueber die Aufzeichnung der Ergebnisse der Film-Ausmessungen.*

Während man bislang bei Gebrauch der subjektiven Methoden für Wachstumsmessungen mehr Wert auf Tabellen legte, lassen sich die Ergebnisse der „verbesserten" kinematographischen Registriermethode nur *graphisch* in handlicher Form wiedergeben. Versieht man eine wachsende Pflanze mit einer Zonenmarkierung und registriert dann während einiger Stunden das Wachstum, so kann man nachher aus dem Film so viele Daten herausziehen, dass eine Tabellendarstellung unübersichtlich würde, es sei denn, man liesse willkürlich — und damit subjektiv — einen Teil der Messwerte weg.

Wir glauben, dass die von uns (H. G. du Buy u. E. Nuernbergk, 1929, I, II,; 1930) angewandte Form der Wachstumsdarstellung in Wachstumskurven, die direkt die Längenzunahme [1]) angeben, am vorteilhaftesten ist

[1]) Da bei Wiedergabe durch Buchdruck die oft umfangreichen Original-Zeichnungen verkleinert werden müssen, empfiehlt es sich, in einer Ecke der Vorlage (vgl. im folgenden Fig. 15, 16, 19 und 20) eine — nachher mitverkleinerte — Maszstabskala anzubringen. Mit Hilfe eines Zirkels können dann später auch *absolute* Zahlenwerte aus den Kurvenwiedergaben ausgezogen werden.

und sich auch am natürlichsten aus der Messung eines „Filmprotokolls" ergibt. Betrachtet man z.B. zwei besonders charakteristische Darstellungen (l.c. 1929, II, Fig. 1 und 1930, Fig. 1), so ergibt sich, dass die Kurven folgende Daten berücksichtigen:

1. Es wird das *beiderseitige Total- und Zonenwachstum* angegeben. Durch Interpolation der totalen Wachstumswerte erhält man ferner das Wachstum der Organmediane.
2. Die Tangenten der Winkel, die die Wachstumskurven mit den Ordinaten bilden, sind ein *Mass für die Geschwindigkeit* des Wachstums pro Zeiteinheit. Aendern sie sich im Verlauf einer Kurve, so zeigt das an, dass sich auch die Wachstumsgeschwindigkeit geändert hat, z.B. bei Lichtwachstumsreaktionen oder im Verlauf der grossen Wachstumsperiode.
3. Aus der Art der *Divergenz der beiderseitigen Wachstumskurven* für eine Zone oder für „Total" ersieht man sofort, ob und wo das wachsende Organ eine Krümmung ausführt, wie stark die Krümmung zunimmt, ob sie basalwärts fortschreitet usw.

   Punkt 3. kann ferner in dem „graphischen Protokoll" noch dadurch besser veranschaulicht werden, dass man

a. die beiderseitigen Wachstumskurven einer Zone oder von „Total" auf dem gleichen Ordinatenpunkt beginnen lässt (auch wenn die eigentlichen Zahlenwerte nicht genau übereinstimmen, vgl. z.B. die von uns gebrachten Kurven (l.c.) 1929, II, Fig. 1, 2, 3 und 1930, Fig. 1, 2, 3),

b. bildlich die Grösse der gemessenen Krümmungen durch Abzeichnen der schwach vergrössert auf ein Stück Papier projizierten Filmbildchen angibt.

Nur die eben erläuterte Art der Kurvendarstellung gestattet, Punkt 1—3 *gleichzeitig und gleichmässig* so zu berücksichtigen, dass Uebersichtlichkeit bestehen bleibt. Nimmt man z.B. eine graphische

Darstellung, wo auf der Ordinate die *Wachstumsdifferenz pro Zeiteinheit* angegeben ist (meist bei der Wiedergabe von Lichtwachstumsreaktionen gebraucht) so ist es nicht mehr möglich, die Grösse und das Entstehen von Krümmungen anschaulich darzustellen, das Gleiche gilt für die Angabe der jeweiligen Gesamtlänge der Pflanze. Aehnliche Einwände kann man gegenüber einer Darstellungsart machen, wo die Ordinaten die *Krümmungswinkel* angeben. In allen solchen Fällen wird bei der Wiedergabe ein einzelner Faktor zu Ungunsten der übrigen in den Vordergrund gedrängt, und man fragt sich z.B., ob nicht die Art der Darstellung u.a. mit dazu beigetragen hat, dass der Lichtwachstumsreaktion eine so grosse Bedeutung für die Entstehung der phototropischen Krümmungen der Avena-Koleoptile eingeräumt worden ist, obwohl es bislang niemandem gelungen ist, eine wirklich befriedigende Parallelität zwischen beiden Erscheinungen aufzufinden, und neuerdings unsere „graphischen Protokolle"deutlich zeichen, dass mindestens die besonders charakteristische *primäre* (kurze) Lichtwachstumsreaktion (l.c. 1929, II, S. 815), weil auf beiden Seiten einer einseitig belichteten Koleoptile nahezu gleichstark auftretend, nicht die grossen Wachstumsdifferenzen verursachen kann, die eine Krümmung bedingen.

Was die Technik des Filmausmessens betrifft, so hat sich ergeben, dass man am besten zu zweien arbeitet, wobei einer das Abfahren der Objektkonturen auf dem Filmbild mittels Messrad vornimmt, während der andere an einem Tisch die gefundenen Werte von der Zählmaschine abliest und gleich in Kurvenform auf Millimeterpapier aufträgt.

IV. *Die Messgenauigkeit der kinematographischen Registriermethode.*

Die Messgenauigkeit, mit der wir einen Wachstumsvorgang kinematographisch verfolgen können, hängt hauptsächlich von dem Grad der Vergrösserung oder Verkleinerung bei der eigentlichen Filmaufnahme und dann von der nachherigen Vergrösserungsmöglichkeit ab. Unserer Erfahrung nach kann man die Filmnegative, wenn sie scharf geraten sind, maximal bis 100 fach linear vergrössern, alsdann ist 1 mm auf dem vergrösserten Bild immer noch

mit Genauigkeit ablesbar, ohne dass das Korn zu störend wirkt.

Der Vergrösserung bei der eigentlichen Filmaufnahme sind durch die Grösse des Objektes Grenzen gesetzt, eine vollständige Avenakoleoptile wird man wohl nur in natürlicher Grösse auf ein Filmbild (18 × 24 mm) bekommen, dagegen etwa nur der Spitzenabschnitt könnte auch *vergrössert* photographiert werden.

Es ergibt sich so, dass man an und für sich *ohne weiteres* Wachstumsmessungen auf 1/100 mm (10 μ) Genauigkeit ausführen kann, wenn die Versuchspflanzen in natürlicher Grösse aufgenommen werden. Diese Genauigkeit erreicht auch das Auxanometer von Koningsberger (1922).

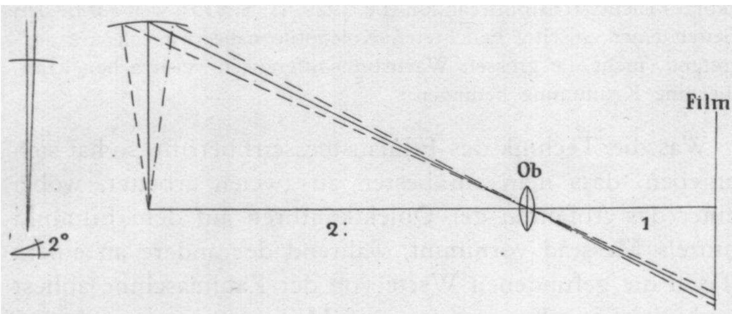


Fig. 14. Die Entstehung von Messfehlern durch die Nutation der Versuchspflanzen.

Es fragt sich aber, ob eine so grosse Genauigkeit immer wünschenswert ist, und ob nicht andere Faktoren, die nicht eliminierbar sind, eine grössere Ungenauigkeit in das Messergebnis hineinbringen. Uns scheinen dabei die von allen wachsenden Pflanzen ausgeführten *Nutationen* die Hauptrolle zu spielen. Gesetzt den Fall, wir messen das Wachstum einer 15 mm langen Avenakoleoptile, so gilt diese Länge nur für die in senkrechter Bildebene vor einem Objektiv stehende Pflanze (Fig. 14). Nutiert nun diese Pflanze nur in der *senkrechten Bildebene,* so wird die Nutation, photographiert, als sehr schwache Krümmung sichtbar und folglich aus dem Messergebnis *eliminiert.* Nutiert aber die Pflanze in der *Richtung der Objektivachse,* so ergibt

die Ausmessung des Filmes nachher, dass die Pflanze bald kleiner, bald grösser wird, und zwar um einen Betrag, der gleich der momentanen *wirklichen* Länge mal dem Cosinus des durch die Nutation entstehenden Ablenkungswinkels ist. So findet man z.B., dass eine 15 mm lange Pflanze bei 2° Nutationsabweichung scheinbar nur noch 14,98085 mm lang ist, d.h. durch die in der Natur oft vorkommende Nutationsabweichung von 2° wird bereits ein Fehler von fast 10 μ in das Messergebnis hineingetragen. Eine 20 mm lange Pflanze würde sogar scheinbar um 12 μ kürzer geworden sein. Dabei gilt diese Berechnung nur, wenn sich die Spitze der Pflanze in der Höhe der Objektivachse befindet. Steht die Spitze oberhalb der Achse, so können die Abweichungen, wie Fig. 14 zeigt, noch grösser werden, und zwar werden sie dann nicht nur negativ, sondern — abhängig von der Brennweite des Objektives — womöglich sogar positiv.

Diese Fehler, die bei subjektiven Beobachtungsmethoden noch mehr ins Gewicht fallen (z.B. Horizontalmikroskop), da dort nicht einmal die Nutation in der senkrechten Bildebene des Objectives eliminiert werden kann, lassen bei den meisten Wachstumsmessungen eine *Genauigkeit von 1/50 mm (20 μ) als hinreichend erscheinen* [1]).

6. Schluss: Einige Beispiele aus der Reizphysiologie mit Erläuterungen über die Anwendungsmöglichkeiten der Apparatur.

Da man vielleicht nicht genügend aus der vorhergehenden Beschreibung der Apparatur und der ihr zu Grunde liegenden Prinzipien ersehen kann, welche Vorteile diese dem

[1]) Man kann vielleicht die Frage aufwerfen, ob nicht die Nichtberücksichtigung der Nutationsbewegungen manchmal bei der Beobachtung von Lichtwachstumsreaktionen Ergebnisse vorgetäuscht hat, die in Wirklichkeit gar nicht vorhanden waren. Bei sehr kleinen „Wachstumsreaktionen" dürfte das wohl möglich sein, auch hat z.B. Gradmann (1927) bei Keimlingen von Helianthus festgestellt, dass die an und für sich schon nicht unbeträchtlichen Nutationen durch geotropische oder phototropische Reizung erheblich verstärkt werden.

Van Dillewijn (1927) hat zwar seine Avenakoleoptilen dadurch an der Ausführung von Nutationen gehindert, dass er ihre Spitzen durch einen am Auxanometer angebrachten Ring schauen liess, aber damit ist wohl nicht ausgemacht, ob so nicht wieder andere Uebelstände, z.B. mechanische Deformationen, einen kleinen Fehler verursachen.

Benutzer gewährend, und wie leicht alle möglichen Versuche relativ schnell und doch *exakt* durchgeführt werden können, so seien hier noch einige Resultate von reizphysiologischen Experimenten wiedergegeben, welche als Anwendungsbeispiele dienen können.

Z. T. sind diese Versuche die direkte Fortführung der von uns früher veröffentlichten Studien (H. G. du Buy und E. Nuernbergk, 1929, I, II und 1930), in denen wir uns näher mit der Wachstumsphysiologie der Avena-Koleoptile beschäftigten, vor allem in Hinsicht auf den Phototropismus dieses Organes; ausserdem werden wir andernorts wieder auf die Versuche zu sprechen kommen.

A. VERSUCHE MIT DER AVENA-KOLEOPTILE (ANSCHLIESSEND AN ABSCHNITT 3 UND 4).[1]

1. *Die Reizschwelle bei* $\lambda = 546\ \mu\mu$.

In unserer dritten Mitteilung (l.c. 1930, S. 554) erwähnten wir kurz unsere Versuche, aus denen sich ergab, dass die Reizschwelle von vorgewärmten Erdpflanzen („Siegeshafer", Ernte 1927), 1—1,5 cm lang,

	Beleuchtung	
für $\lambda = 436\ \mu\mu$	breitseitig	bei etwa 0,22 Erg/(cm^2 sec)
	schmalseitig	„ „ 0,42—0,50 „ „ „

liegt, wenn 2—3 mm der Spitze beleuchtet werden, und *nicht* klinostatiert wird. War somit ein *absolutes* Mass der Reizschwelle für eine *sehr stark* phototropisch wirksame Wellenlänge gegeben, so interessiert es andererseits auch, die absolute Empfindlichkeit der Koleoptile in weniger phototropisch wirkenden Spektralbezirken kennen zu lernen.

[1]) Die meisten dieser Versuche wurden mit „Siegeshafer" von Svalöf (1927) angestellt, einige wenige auch mit „Orionhafer II" (1928), dessen Verhalten sich kaum von dem des Siegeshafers unterschied.

Vor allem ist es in Hinsicht auf methodische Gründe, (passende Wahl von Lichtfiltern etc) wichtig, wenn man weiss, wie weit die phototropische Empfindlichkeit nach dem Rot zu geht. Hierüber existieren in der Literatur sehr widerspruchsvolle Angaben, z.B. erwähnt Blaauw (1909, S. 68, 78, 118), dass seine Versuchspflanzen zwar gegen Orange-Rot von etwa 535 $\mu\mu$ an fast unempfindlich seien, dass aber bei sehr langdauernder Belichtung doch zum Schluss phototropische Krümmungen entständen.

Als praktische Grenze bei seinen Berechnungen der phototropischen Empfindlichkeit gibt Blaauw $\lambda = 534\ \mu\mu$ an. Koningsberger (1922, S. 77) führt einige wenige Versuche an, die die Frage nicht mehr klärten, und Sonne (1929, S. 780) gibt an, bei $\lambda = 570\ \mu\mu$ (?, soll es nicht $\lambda = 578\ \mu\mu$ sein?) phototropische Krümmungen gefunden zu haben.

Bergann (1930, S. 726) fand, dass „dauernd gebotenes Rot, Orange und Gelb mindestens bis zu $\lambda = 540\ \mu\mu$ unwirksam ist."

Wir haben nun, um diese Frage zu klären, mit sehr hohen Lichtintensitäten 3 Versuchsreihen vorgenommen, welche folgendes ergaben:

1. Rot von $\lambda = 600$—$730\ \mu\mu$ (Schwerpunkt der Strahlung bei $\lambda = 610\ \mu\mu$) bewirkte selbst bei Intensitäten von ca 3000 Erg/(cm^{2}sec) während mehrstündiger Bestrahlung (vgl. im folgenden S. 498) nicht die Spur einer phototropischen Krümmung.
2. Gelb, $\lambda = 578\ \mu\mu$ ergab in mehrstündiger Bestrahlung mit bis zu max. 1200 Erg/cm^{2}sec) ebensowenig Krümmungen.
3. Grün, $\lambda = 546\ \mu\mu$ konnte, wenn nur genügend intensiv dargeboten, die Versuchspflanzen zu sehr *starken* phototropischen Krümmungen veranlassen. Von den verschiedenen, mit $\lambda = 546\ \mu\mu$ gemachten Versuchen seien hier zwei wiedergegeben.

Der Versuch der Tab. 12 wurde in 12 Min. Abständen kinematographisch registriert, aus dem nachher auf das 20-fache der natürlichen Grösse vergrösserten Film konnte man das Ergebnis der Tabelle sehr deutlich und einwandfrei herauslesen. Die Reizschwelle von Wasserpflanzen (Sorte „Siegeshafer" von Svalöf, Ernte 1927), ca 15 mm lang, beträgt also
für $\lambda = 546\ \mu\mu$ bei schmalseitiger 3 mm Spitzenbeleuchtung
ca 26—27000 Erg/(cm²sec).

Tab. 11.

Reizschwellenversuch mit $\lambda = 546\ \mu\mu$. 3 mm schmalseitige Spitzenbeleuchtung von vorgewärmten Erdpflanzen, kein Klinostatieren. 26. IX. 30. J = 556 Erg/(cm²sec), $\lambda = 546 \mu\mu$. Jede Serie = 3—4 Pflanzen. Temp. = 22° C.

	t	J. t. (Erg/(cm² sec))	Krümmung 2 Std. nach Beleuchtung
1.	20 Sek.	11.120	0—0
2.	60 Sek.	33.360	0—0
3.	165 Sek.	91.700	schwach +, deutlich sichtbar
4.	300 Sek.	166.800	stark +
5.	600 Sek.	333.600	sehr stark +
6.	Dauerbeleuchtung		„ „ +, bis zu 70—80°

Sie ist somit rund 50.000 mal energetisch höher als die Reizschwelle für $\lambda = 436\ \mu\mu$, d.h. die Empfindlichkeit beträgt für $\lambda = 546\ \mu\mu$ nur etwa den 50.000. Teil der Empfindlichkeit für $\lambda = 436\ \mu\mu$.

Da die Reaktionszeit bei der Reizschwelle etwa 60 Min. betrug, und solche schwachen Krümmungsstadien bald wieder verschwinden, ist es einleuchtend, dass wir bei dem Versuch der Tab. 11 bei 33.360 Erg nach 2 Stunden

keine Krümmung mehr wahrnehmen konnten; in der Zwischenzeit war keine Beobachtung erfolgt, und die sehr schwache Krümmung hatte sich unterdessen geotropisch wieder ausgeglichen.

Tab. 12.

Reizschwellenversuch mit $\lambda = 546\ \mu\mu$. 3 mm schmalseitige Spitzenbeleuchtung von „Wasser"- (im Wasser gezogene) Pflanzen, kein Klinostatieren. Kinematographisch registriert von jeder Serie 2 Pflanzen. Temp. 22° C. Vers. A 25.
$J = 1330$ Erg/(cm²sec.).

	t	J. t (Erg/ (cm² sec))	Krümmung.
1.	10 Sek.	13.300	0—0
2.	20 Sek.	*26.600*	*Deutliche Spur einer Krümmung. RS.*
3.	30 Sek.	39.900	sehr schwache + Kr.
4.	40 Sek.	53.200	„ + „
5.	50 Sek.	66.500	„ + „
6.	60 Sek.	79.800	+ „
7.	70 Sek.	93.100	stärkere + „

Wenn nun Blaauw und Sonne doch angeben, im Gelb bzw. Rot Krümmungen gefunden zu haben, so erklären wir das so, dass das dargebotene Licht *nicht völlig* rein war. Blendet man mit einem Monochromator aus einer Lichtquelle einen bestimmten Spektralbezirk aus, so ist dieser spektrale Ausschnitt nicht ohne weiteres völlig rein, sondern enthält noch falsches Licht (Weigert 1927, S. 93 u.a.O.) das durch Reflexion und Streuung in den verschiedenen Teilen des Spektralapparates hervorgerufen wird. Dieses falsche Licht lässt sich nur mit Hilfe eines zweiten Monochromators (Vorzerleger!) oder geeigneter Farbfilter praktisch genügend beseitigen, was Blaauw und anscheinend

auch Sonne nicht getan haben. Bei einem Reizschwellenversuch mit $\lambda = 578\ \mu\mu$ erhielten wir gelegentlich auch sehr schwache Krümmungen, aber die nähere Untersuchung ergab, dass sehr geringe Spuren zerstreuten weissen Lichtes, die mit dem dunkel adaptierten Auge nur als ganz fahler, nebelhafter Schimmer zu erkennen waren, seitlich von den Filtern mit auf die Pflanzen gelangt war und bei der langen Dauer der Beleuchtung schliesslich die Reaktion veranlasst hatten. Bei den „experimenta crucis" wurde von uns genügend darauf Rücksicht genommen, dass dieser Fehler vermieden war.

Dass Bergann *keine* Krümmungen bis $\lambda = 540\ \mu\mu$ gefunden hat, kann vielleicht daran liegen, dass er zu geringe Intensitäten verwendet hat.[1]) Ueberhaupt ist seine Versuchsanordnung wie auch die von Bachmann und Bergann (1930) wenig dazu geeignet, in denjenigen Spektralbezirken, in denen die Grenzen der phototropischen Empfindlichkeit liegen, eine exakte Festlegung der Empfindlichkeitskurve zu vermitteln. Bachmann und Bergann arbeiten mit Filtern und *Lichtquellen mit kontinuierlichem Spektrum*, wenn sie daher Versuche mit ihrem Gelbgrün- Filter, das eine Durchlässigkeit von 500—580 $\mu\mu$ aufweist (Bergann 1930, S. 670), durchführen, so ist nachher schwer auszumachen, ob eine etwa auftretende Reaktion durch die um 500 $\mu\mu$ oder die um 580 $\mu\mu$ herumliegenden Wellenlängen bewirkt wird, da beide Spektralbezirke gleichzeitig auf die Pflanzen eingewirkt haben. Man wird daher mit einer solchen Methode nur summarische Resultate erzielen können, welche u.E. nach nicht ohne weiteres dazu ausreichen, eine *einwandfreie* Empfindlichkeitskurve zu konstruieren. Um zu einer solchen zu gelangen, muss man analog verfahren, wie wir es bei

[1]) Deutliche Intensitätsangaben fehlen bei Bergann's diesbezüglichen Versuchen.

der Eichung unserer Photozelle (S. 459, Tab. 10) getan haben, d.h. das Licht ist mit einem Monochromator unter Zuhilfenahme von Filtern spektral zu zerlegen, ausserdem ist es wünschenwert, zur Kontrolle Versuche mit einzelnen, leicht isolierbaren und lichtstarken Spektrallinien (z.B. denen der Hg-Lampe) auszuführen.

Oben wurde festgestellt, dass nach unseren Messungen das Empfindlichkeitsverhältnis der Avena-Koleoptile für $\lambda = 436\ \mu\mu$ und $\lambda = 546\ \mu\mu$ etwa 1 : 50.000 beträgt. Dieses Resultat stimmt sehr schlecht zu der Angabe Sonnes (1929, S. 782), dass das E.-V. für beide Wellenlängen nur 1 : 10.000 beträgt. [1]) Wir erklären diese Differenzen wieder so wie oben, d.h. das aus dem Monochromator kommende Licht war bei Sonne nicht völlig von Blau gesäubert. Auch in einem anderen Punkt harmonieren unsere Ergebnisse wenig, sofern wir die Daten von Sonne richtig interpretieren. Wir fanden als Energieintensität bei der Reizschwelle für $\lambda = 436\ \mu\mu$ 0,5 Erg/(cm^{2}sec) und für $\lambda = 546\ \mu\mu$ 26000 Erg/(cm^{2}sec). Sonne gibt zwar keine direkten Erg-Werte an, aber wohl einen konstanten Faktor L, mit dem die mit dem Thermoelement ermittelten Energiewerte zu multiplizieren sind. Dieser Faktor L hat nach Angabe von Sonne (l.c. S. 780) die Grösse von $0{,}86.10^{-5}$ cal/cm^{2}sec. Das entspricht (vgl. S. 451) 360 Erg/cm^{2}sec. Dieser Faktor L soll nach Sonne das Aequivalent für die Lichtenergie *weissen Lichtes* sein, das nach Blaauw (1909) für die Reizschwelle nötig ist, also 20 HK. Wenn man nun mit dem Faktor L die Energieangaben von Sonne multipliziert, so findet man, dass die Reizschwelle für $\lambda = 436\ \mu\mu$

[1]) Nimmt man an, dass Sonne seine Keimlinge bei $\lambda = 436\ \mu\mu$ schmalseitig, bei $\lambda = 546$ breitseitig beleuchtet hat, so würde das Verhältnis doch noch mehr als doppelt zu klein sein, sofern die Reizschwelle für $\lambda = 546\mu\mu$ ebenso, wie wir es bei $\lambda = 436\mu\mu$ gefunden haben, bei breitseitiger Belichtung etwa halb so gross wie bei schmalseitiger Belichtung ist.

nach Sonne bei etwa 10 Erg/(cm²sec), für $\lambda = 546\ \mu\mu$ aber bei 133.500 Erg/(cm²sec) liegt. Diese Werte sind 20—5 mal höher als die entsprechenden, von uns gefundenen Daten.

Eine Interpretation dieser Differenzen ist schwer möglich. Da Sonne seine Apparatur nicht genau beschreibt, ist nicht festzustellen, wie er die Eichung seines Thermoelementes durchgeführt hat, und ob er wirklich bei der Reizschwelle solche hohen Intensitäten, die nach unseren Erfahrungen (vgl. S. 494, Tab. 11, 12 und du Buy u. Nuernbergk 1929, II und 1930) bereits sehr *starke* phototropische Krümmungen erzeugen, gemessen hat. Vielleicht ist auch die kinematographische Beobachtung der Reizschwelle empfindlicher, da man bei stärkerer Vergrösserung der Filmbildchen, die man in aller Ruhe später ausführen kann, sehr kleine und schwache Krümmungen sehr deutlich erkennen und feststellen kann, doch dürfte dieser Umstand nach unseren Erfahrungen nicht mehr als 30—40 % Differenz in der stets etwas subjektiven Wahrnehmung der Reizschwelle ausmachen, während die Unterschiede zwischen den Angaben von Sonne und uns 2000 bzw. 500 % betragen.

In jedem Fall ist es u.E. nach nicht zweckmässig, bei solchen Untersuchungen mit monochromatischem Lichte zur Intensitätsangabe sich auf „reines weisses Licht" (von uns hervorgehoben) zu beziehen. Weisses Licht ist nicht als rein zu bezeichnen, da es ja (meist sehr verschiedenartig) zusammengesetzt ist, es ist also ein sehr variierender Faktor, dessen Gebrauch als Energie-Einheit bei quantitativen physiologischen Untersuchungen nur unter ganz besonderen Bedingungen zulässig ist (vgl. oben S. 451 und S. 462).

2. *Der Einfluss von gelbem* ($\lambda = 578\ \mu\mu$) *und roten* ($\lambda = \approx 610\ \mu\mu$) *Licht auf das Wachstum.*

Auf S. 493 hatten wir schon erwähnt, dass weder Gelb

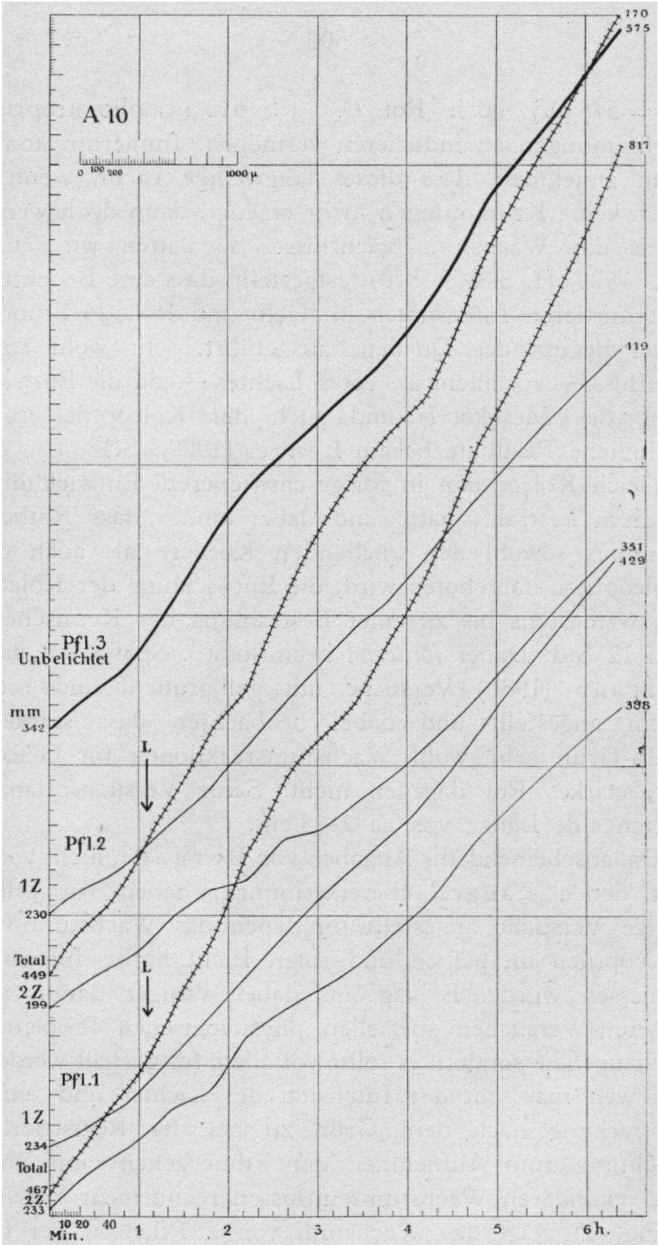


Fig. 15. A 10. Wachstum von Avenakoleoptilen bei totaler einseitiger Dauerbelichtung mit 1300 Erg/(cm² sec), λ = 578 μμ (Gelb). M 53 : 1 (18,8 μ in der Natur = 1mm).

($\lambda = 578\,\mu\mu$) noch Rot ($\lambda = \approx 610\,\mu\mu$) phototropische Krümmungen zu induzieren vermögen. Immerhin konnte man annehmen, dass dieses langwellige Licht, wenn es auch keine Krümmungen mehr erzeugt, dann doch wenigstens das Wachstum beeinflusst. So hatten wir früher (l.c. 1929, II, S. 809, 810) festgestellt, dass eine Belichtung mit mittleren Intensitäten im Gelb und Rot, 24 Stunden nach Beginn des Quellens ausgeführt, sehr wohl einen Einfluss — vor allem des roten Lichtes — auf die Entwicklung des Mesokotyls und auch der Koleoptile ergab. Aehnliche Resultate bekam Lange (1929, S.18 ff), der zugleich Koleoptilen in fortgeschrittenerem Entwicklungsstadium bestrahlt hatte und dabei fand, „dass Rotlicht, wenn es sowohl den quellenden Körnern als auch den Koleoptilen dargeboten wird, die Entwicklung der Koleoptile wenigstens bis zu einer Bestrahlung der Keimscheide von 12 Std. Dauer *fördernd* beeinflusst". Später hat dann Bergann (1930) Versuche mit gelbgrünem und roten Licht angestellt und dabei beobachtet, dass stärkeres Gelb-Grün sehr wohl Wachstumsreaktionen im Gefolge hat, starkes Rot dagegen nicht. Seine Versuchspflanzen hatten eine Länge von ca 2—3 cm.

Da anscheinend die Angaben von Bergann nicht völlig mit denen Langes übereinstimmen, haben wir selbst einige Versuche angestellt, in denen das Wachstum von Koleoptilen im gelben und roten Licht hoher Intensität gemessen wurde. Es lag uns dabei weniger daran, mit unseren Versuchen speziellen physiologischen Problemen nachzugehen, sondern es sollte vor allem festgestellt werden, wie weit man mit der Intensität des Lichtes und seiner Erstreckung nach dem Grün zu bei der Registrierbeleuchtung zum Aufnehmen der Filme gehen kann, ohne mit sekundären Wachstumseinflüssen rechnen zu müssen.

Fig. 15 zeigt das Wachstum von 2 Pflanzen bei Bestrahlung mit Gelb ($\lambda = 578\,\mu\mu$) in hoher Intensität, 1300

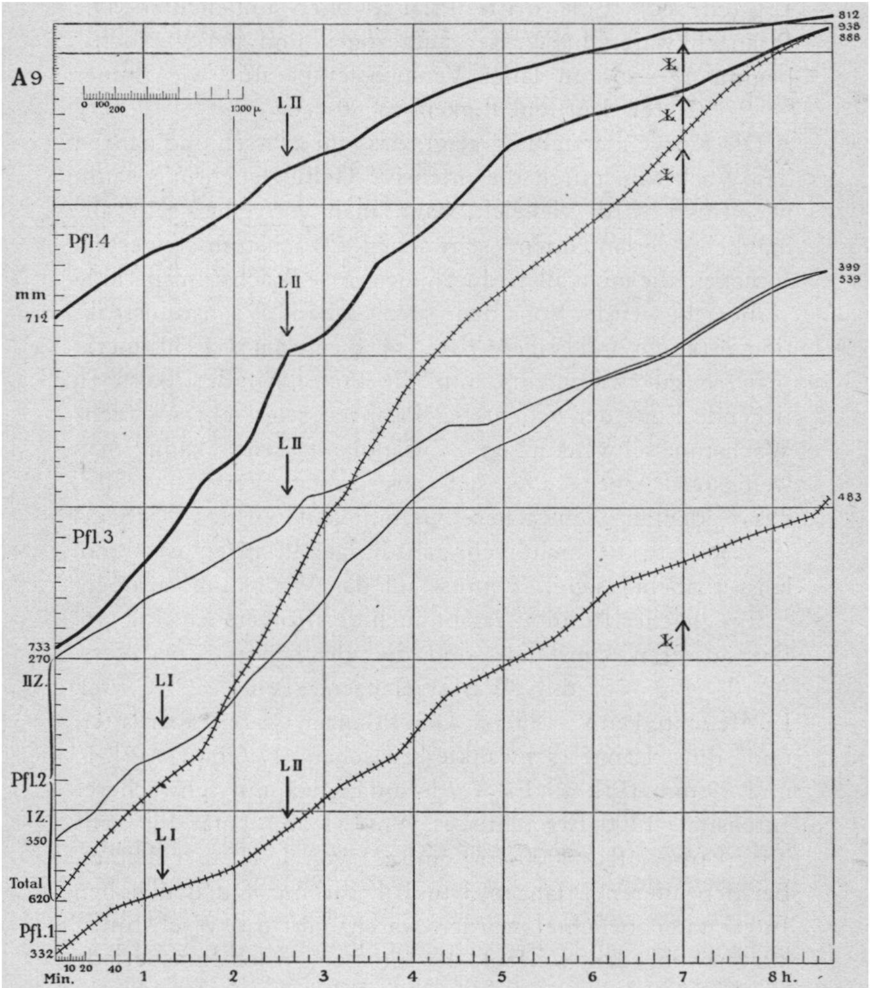


Fig. 16. A 9. Wachstum von Avenakoleoptilen bei totaler, einseitiger Dauerbelichtung mit 1300 Erg/(cm² sec) von L I ab, und 3000 Erg/cm² sec) von L II ab. Rot ($\lambda = \approx 610\ \mu\mu$). M 53 : 1 (18,8 μ in der Natur = 1 mm).

Erg/(cm^2sec). Eine dritte Pflanze blieb unbelichtet. Die Pflanzen waren in Wasser aufgezogen und bei Versuchsbeginn 18—25 mm lang. Versuchstemperatur wie immer = 22° C, rel. Luftfeuchtigkeit ca 90 %.

Die Kurvendarstellung zeigt, dass im grossen und ganzen das Wachstum durch die intensive Gelbbeleuchtung kaum beeinflusst wird, vielleicht kann man von einer sehr allmählich verlaufenden schwachen Wachstumssteigerung sprechen, die nicht allein durch die grosse Wachstumsperiode verursacht wird. Von den spezifischen Wachstumsreaktionen (kurze und lange W.-R., vgl. Bergann, 1930) merkt man so gut wie nichts, nur die 2te, nach der Basis zu liegende Zone der belichteten Pflanzen zeigt sehr schwache Wachstumsschwankungen. Zusammenfassend kann man wenigstens sagen, dass sich aus diesem Versuch ergibt, dass jedenfalls schwächere Gelbintensitäten ($\lambda = 578\ \mu\mu$) (< 1300 Erg) bei nicht mehr ganz jungen Pflanzen (ca 20 mm lang u. mehr) *keinen Einfluss* auf das Wachstum ausüben.

Ein gleiches Resultat ergibt auch der Rotversuch, Fig. 16. Die äusseren Umstände sind die gleichen wie bei Vers. A 10, Fig. 15, d.h. Wasserpflanzen, Temp. 22° C, rel. Luftfeuchtigkeit = 85 %. Die Pflanzen waren aber älter, und ihre Länge schwankte zwischen 17,6 mm (Pfl. 1) und 39 mm (Pfl. 3). Es wurde anfänglich mit schwächerer Intensität, 1300 Erg/(cm^2sec) von L I ab, später mit sehr hoher Intensität, 3000 Erg/cm^2sec) von L II ab belichtet. Bei den älteren Pflanzen 3 und 4, die nur mit den hohen Intensitäten belichtet worden waren, gibt die Wachstumskurve wohl den Verlauf der grossen Wachstumsperiode wieder. Dagegen kann man bei Pfl. 1 und 2 vielleicht davon sprechen, dass nach Einsetzen der Belichtung das Wachstum etwas erhöht wird. Im weiteren Verlauf freilich, besonders nach Verstärkung der Belichtung von L II ab, sinkt die Wachstumsgeschwindigkeit wieder nach und nach und bleibt so auch bestehen, obwohl die letzten

1½ Std. das Licht überhaupt abgeschaltet war. Ob dieses auf den Einfluss des verstärkten Lichtes oder auf den der grossen Wachstumsperiode zurückzuführen ist, wagen wir vorderhand nicht zu entscheiden. Wir dürfen aber auch aus dem Rotversuch die gleiche Konklusion wie aus dem Gelbversuch ziehen, dass nicht zu starkes Rotlicht *keinen Einfluss* auf das Wachstum nicht mehr ganz junger Pflanzen ausübt.

Ein Vergleich unserer Resultate mit denen Langes (1929) und Bergann's (1930) ist leider nur in grober Annäherung möglich, weil man nicht genügend über die Lichtintensitäten unterrichtet wird, mit denen sie ihre Pflanzen belichtet haben. Lange gibt überhaupt kein Mass für die Stärke der von ihm verwandten Rotbeleuchtung an, Bergann nur ein sehr relatives, aus dem es für den uneingeweihten Leser so gut wie unmöglich ist, sich ein richtiges Bild von der wahren Lichtintensität, die bei seinen Versuchen jeweils geherrscht hat, zu machen [1]). Die Versuche von Lange, wo

---

[1]) Die Versuchsanordnung von Lange konnten wir zwecks thermoelektrischer Messung der Energie nicht reproduzieren, da uns die von ihm benutzte Boraxkarmin-Filterlösung nicht zur Verfügung stand, und Lange andererseits nicht die genauen Durchlässigkeitswerte dieses Filters für die einzelnen Spektralgebiete mitteilt. Dagegen haben wir die Anordnung von Bergann für Rotbeleuchtung nachgeahmt, indem wir das Licht einer Philips-Kinolampe von 500 Watt (105 V) in 30 cm Entfernung mit unserer geeichten Thermosäule massen, wobei in den Strahlengang Filter RG1 (2 mm) + $CuSO_4$ 6 % (1 cm) + Wasser (5 cm) eingeschaltet war. In 30 cm Entfernung ist die Rotintensität dann rund 1890 Erg/ (cm^2sec). Berücksichtigt man dann, dass Bergann nicht 500 W Lampen, sondern 2 einfache 1000 W Projektionslampen verwendet hat, deren Intensität sich nach der Osram-Liste 7 (1929) und der Philips-Liste „Bioscooplampen" so wie 12500 zu 21500 HL = 1 : 1,7 verhalten, so hätte demnach Bergann bei seinen Rotversuchen mit der rel. Intensität = 3420 (l.c. S. 700) mit rund 6500 Erg/(cm^2sec) bestrahlt.

Wir versuchten, die bei dem Bergann'schen Rotversuch wirkenden Intensitäten auch aus den verschiedenen Angaben von Bachmann

er die Koleoptilen mit Rot beleuchtet hat, sind von uns schon oben (S. 498) erwähnt worden, sie sprechen ebenso wie unsere eigenen Mesokotylwachstumsversuche (l.c. 1929, II, S. 809, 810) dafür, dass es darauf ankommt, wie alt die Koleoptilen sind, und dass man wohl mindestens sehr lange und nicht zu schwach beleuchten muss, dann aber wohl einen Roteinfluss auf das Wachstum erzielt. Andererseits zeigen die Versuche Bergann's mit starkem Rotlicht wieder klar, dass die älteren Pflanzen nicht mehr deutlich auf diesen Spektralbezirk reagieren [1]).

Um noch auf die Gelb-Grün-Versuche Bergann's zurückzukommen, so beweist unser Versuch A 10 (Fig. 15), dass irgendwelche kurze Wachstumsreaktionen nichts mit

---

(1929) und Bergann (1930) zu berechnen, kamen aber dabei zu keiner guten Uebereinstimmung mit dem eben angegebenen Wert. Nach Bachmann (1929) werden (Tab. 14, S. 517) von dem Filter RG1 + 6 % $CuSO_4$ (1 cm) von einer 250 W Projektionslampe in 1 m Abstand 0,0177 cal/(cm² *Std*) = 206 Erg/(cm² *sec*) ausgestrahlt. Nach Bergann 1930, S. 670) verhält sich nun die Intensität der Bachmannschen 250 W Lampe hinter dem Rotfilter zu der Intensität der Bergannschen 1000 W Lampe so wie 40 : 228 = 1 : 5,7. Demnach wäre die Intensität der Bergannschen 1000 W Lampe in 1 m Entfernung = 5,7 . 206 = 1175 Erg/(cm² sec). Bei 2 Lampen wären das = 2350 Erg. Wenn jetzt aber von Bergann in 30 cm Entfernung belichtet wird, so würde er bei Gültigkeit des Quadratgesetzes (vgl. Anm., S. 449) eine Intensität von $1/0{,}3^2$. 2350 Erg = 26100 Erg/(cm²sec) zur Verfügung haben. Gilt jedoch das Quadratgesetz nicht, sondern einfache Proportionalität, so würde die Intensität nur 1/0,3 . 2350 = 7840 Erg/(cm²sec) betragen. Dieser letzte Wert würde einigermassen mit unserem Messergebnis übereinstimmen, bei der grossen Unsicherheit aber, die solchen nachträglichen Berechnungen von Angaben anderer Autoren anhaftet, haben wir lieber davon abgesehen, den Versuch zu machen, auch die übrigen relativen Intensitätsdaten, die Bergann bei seinen anderen Versuchen angibt, auf absolute Erg-Einheiten zurückzuführen.

[1]) Beiläufig sei erwähnt, dass wir ebenso wie Bergann (1930, S. 725) beobachten konnten, das die Primärblätter der Haferkeimlinge nach längerer intensiver Rotbestrahlung ergrünen. Bei starker Belichtung mit $\lambda = 578 \mu\mu$ trat jedoch das Ergrünen kaum mehr auf.

dem gelben Anteil des Lichtes zu tun haben, wie Bergann auch schon vermutet hatte, sondern nur auf Rechnung des beigemengten grünen Lichtes zu setzen sind. Auch die Versuche Koningsbergers (1922, S. 95, Fig. 13, Kurve H und I), die freilich nicht mit starken Intensitäten angestellt sind, ergeben nur minimale Wachstumsreaktionen in Gelb und Rot, stimmen also gleichfalls mit unseren Feststellungen überein.

Wie wir vorhin (S. 500) erwähnt hatten, sind die soeben beschriebenen Wachstumsversuche hauptsächlich mit Rücksicht auf die Filterdurchlässigkeit der Registrierbeleuchtung angestellt worden. Weitere Angaben über diese Themen hofft der eine von uns andernorts zu geben. Jetzt mögen die auf die Filter bezüglichen Daten folgen:

1. Die gewöhnlich beim Hantieren mit den Versuchspflanzen gebrauchten Sirius-Dunkelkammerlampen mit Schottfilter RG1 (S. 486) liefern hinter $CuSO_4$ 6 % (1 cm)+ Wasser (5 cm) in 30 cm Entfernung etwa 54—86 Erg/(cm²sec) starkes, bei $\lambda = 600\ \mu\mu$ beginnendes rotes Licht. Ohne $CuSO_4$ beträgt die Energie, auf die hauptsächlich für das Auge bzw. die Pflanzen in Betracht kommenden Wellenlängen von $\lambda = 610—650\ \mu\mu$ (vgl. Fig. 6, II) bezogen, etwa das Doppelte, also rund 100—150 Erg/(cm²sec).
2. Setzt man vor die 3 Registrierlampen für auffallende Beleuchtung (vgl. S. 467) 6 % $CuSO_4$ (1 cm)+ 5 cm Wasser, so beträgt die Energie am Standort der Pflanzen, wenn RG1 als Rotfilter dient, etwa 450 Erg/(cm²sec). Mit dieser, 15 Sec. lang strahlenden Energie, die nur $^1/_6—^1/_7$ so stark ist wie die bei Versuch A 9 während 4½ Std. einwirkende Energie, erzielt man bei Blende 1 : 15 von Avenapflanzen gut durchbelichtete Filmnegative auf Agfa-panchromatischem Film. Gebraucht man aber die Lampe für durchfallende Registrierung, so ist die notwendige rote Lichtenergie nur

etwa $^1/_{10}$ so stark, also ca. 45 Erg/(cm²sec). Diese Energie ist weniger als ½ so gross als die von uns bei Belichtung der keimenden Haferkörner zwecks Beeinflussung des Mesokotylwachstums angewandte Rotbeleuchtung von 110 Erg/(cm²sec) (l.c. 1929, II, S. 809), mit der wir trotz der relativ viel höheren Empfindlichkeit des Versuchs-Materials erst nach mehrstündiger Dauerbeleuchtung physiologische Einflüsse erzielen konnten.

Somit ist wohl der Beweis erbracht, dass unsere Methode der Wachstumsregistrierung mit einer Filmbeleuchtung arbeitet, die für Avenapflanzen (und natürlich auch alle weniger empfindlichen Pflanzen) als völlig einwandfrei bezeichnet werden darf.

C. DIE KOMPENSATION DER ROTATIONSKRÜMMUNGEN VON WURZELN VON LEPIDIUM SATIVUM AM INTERMITTIERENDEN KLINOSTATEN (ANSCHLIESSEND AN ABSCHNITT 5).

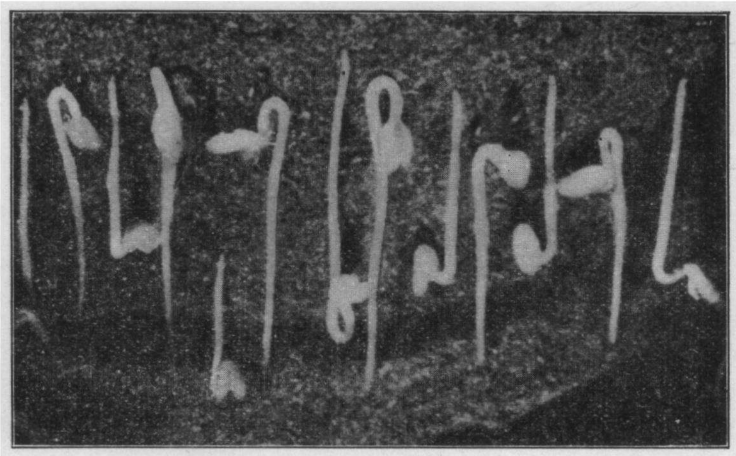
Als Zimmermann die merkwürdige Erscheinung der Rotationskrümmungen studiert hatte (1924), welche ein Beweis dafür sind, dass das Sinusgesetz des Geotropismus für Wurzeln nur beschränkt Gültigkeit haben kann, hat er keine Versuche darüber publiziert, was für geotropische Reizzeiten in Horizontallage nötig sind, um diese Rotationskrümmungen kompensieren zu können. Folgt man den Anschauungen Zimmermans, dass die Rotationskrümmung in der Tat auf einem Unterschied in der Nachwirkung der Normal- oder Inversstellung auf einen vorangegangenen tropistischen Reiz beruht, so besteht die Möglichkeit, die Intensität dieser Nachwirkung zu bestimmen, wenn man durch einen Kompensationsreiz die Krümmungstendenz aufheben kann. Will man ausserdem noch das Wachstum während einer bestimmten Zeit lang kontrollieren, so muss dazu *während* des Versuches photographiert werden, ohne dass dabei irgendwelche besondere geotropische Reizungen entstehen können.

Da unsere Versuchsapparatur in Verbindung mit dem Universalklinostaten derartige Versuche leicht durchzuführen gestattet, haben wir einige Experimente mit Lepidium-Wurzeln vorgenommen, die folgendermassen verliefen: Die Wurzeln, auf feuchtem Fliesspapier befindlich, wurden senkrecht zur horizontalen Klinostatenachse klinostatiert (1 Umdr./Min. in der Uhrzeigerrichtung), wobei in allen 4 Quadranten (± 0° = Normallage, + 90° = Horizontallage *vor* Inversstellung, ± 180° = Inverstellung, —90° = Horizontallage *vor* Normallage) intermittiert wurde. In der Inversstellung wurde photographiert, die Normallage diente zur Kompensation der Inversstellung, und zwar wurde in beiden Lagen gleich kurz intermittiert. In der +90° und —90° Lage wurde geotropisch gereizt. Würden die Reizzeiten sowohl bei +90° als auch —90° gleich gross sein und *keine* Krümmung auftreten, so wäre das Sinusgesetz erfüllt, tatsächlich muss aber die —90° Lage länger andauern, da sie ja erst *nach* der Inversstellung erfolgt, wenn die Wurzeln gerade bleiben sollen. Folgende Versuchsserien sind ausgeführt worden:

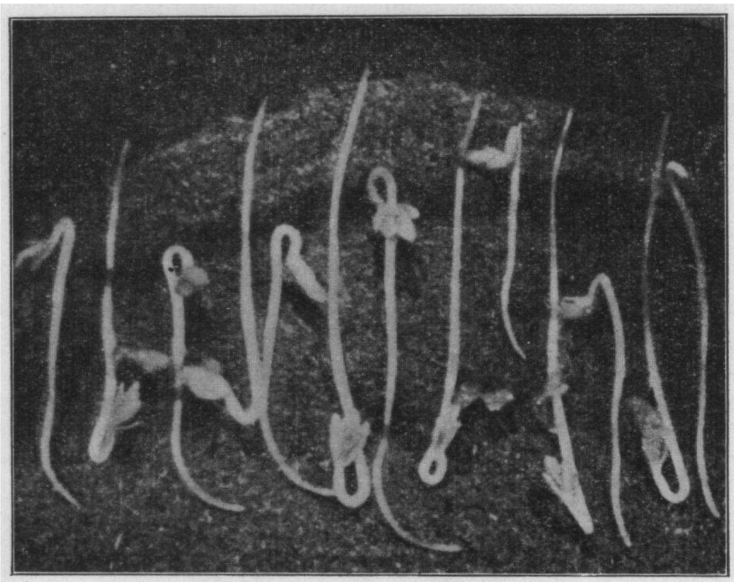
Alle 12 Min. ein Filmbild und 10 Umdrehungen. Intermittenzzeiten:

Nr.	0°	180°	+90°	—90°	Differenz	Ergebnis d. Kompensation.
1,5.	31,0 Sek.	31,0 Sek.	20,0 Sek.	38,0 Sek.	18,0 Sek.	Ueberkompensation.
2.	31,8 Sek.	30,0 Sek.	22,2 Sek.	36,8 Sek.	14,6 Sek.	Ueberkompensation schwächer.
3.	30,5 Sek.	30,5 Sek.	25,0 Sek.	34,0 Sek.	9,0 Sek.	Ueberkompensation noch schwächer.
4.	30,0 Sek.	30,0 Sek.	27,5 Sek.	32,5 Sek.	*5,0* Sek.	*Kompensation, Wurzeln bleiben völlig gerade.*

Von Versuch 2 stammen die Figuren *17a und b* (Der Film des Versuches 4 war für die Reproduktion ungeeignet). Die senkrecht nach oben stehenden Wurzeln sind nach 10 stündigem Rotieren nahezu gerade geblieben, die senkrecht



a



b

Fig. 17 LW 2. Kompensation von Rotationskrümmungen bei Wurzeln von Lepidium sativum während des Klinostatierens. a. Die Wurzeln bei Versuchsbeginn. b. 10 Std. lang klinostatiert. Die nach oben stehenden Wurzeln sind infolge Kompensation nahezu gerade geblieben, die nach unten stehenden zeigen starke Rotationskrümmungen.

nach unten stehenden Wurzeln weisen dagegen starke Krümmungen auf, die die Folgen des Rotations- + geotropischen Zusatzreizes (wegen der ungleichen Reizgrösse in +90°- und —90°-Lage) sind. In der Lage, wie diese letzten Wurzeln sich in Fig. 17*b* befinden, ist für den Spitzenteil auch Kompensationstellung erreicht, wobei die 4 Quadranten *gegen* die Richtung des Uhrzeigers um 90° gedreht sind, sodass 0° = —90°, 180° = +90°, +90° = 0° und —90° = 180° werden. Alsdann wird in den beiden neuen 90° Lagen gleichlang gereizt, aber Ruhe- und Inverslage differieren um ca 15 Sek. in der Zeit, und zwar wird in Ruhelage länger aufgehalten, sodass sich die vorangehende (neue —90°) geotropische Reizung *besser* auswirken kann. Umgekehrt wird in Inverslage kürzer intermittiert, sodass die ursprünglich stärker wirkende Reizung in der (neuen) +90° Stellung sich *nicht so gut* auswirken kann.

Bei dem Versuch 4, wo für die nach oben stehenden Wurzeln genau durch 5 Sek. Reizdifferenz zwischen +90° und —90° Lage Kompensation erzielt worden ist, beträgt für die nach unten stehenden Wurzeln die Verschiebung der 4 Quadranten längst nicht 90°, sondern höchstens etwa 45°. In dieser Stellung befindet sich der Spitzenteil wohl auch in Kompensationsstellung, die jedoch nunmehr viel schwieriger zu übersehen ist, da sie die kombinierte Reizwirkung einer *fiktiv verkürzten* —90° Lage (dadurch, dass diese nunmehr —135° Lage geworden ist, und sich überdies die 180° Stellung in eine im Sinne der bisherigen +90° Lage stärker reizende +135° Position verwandelt hat) *und* einer *fiktiv verlängerten* 0° Stellung (die sich analog aus der nunmehrigen —45° Lage + der Verwandlung der bisherigen +90° Lage in die weniger reizend wirkende +45° Lage ergibt) darstellt. [1])

---

[1]) Beiläufig sei bemerkt, dass die +90° Lage bei unseren Versuchen 1—5 (S. 507) zur Kompensation der Rotationskrümmungen natürlich nicht notwendig ist. Hierfür würde die —90° Stellung von bestimmter Zeitdauer vollauf genügen.

Wir betrachten es nicht als unsere Aufgabe, an dieser Stelle eine eingehende Analyse dieser Fragen zu geben, welche im wesentlichen ja darauf hinauslaufen, festzustellen, ob die Längskraft *linear* oder *logarithmisch* abhängig ist

1. von dem *Produkt* aus Zeit *und* Sinus des Abweichungswinkels oder
2. von Zeit und Sinus des Abweichungswinkels, aber dabei jeweils unabhängig von dem Produkt dieser 2 Faktoren.

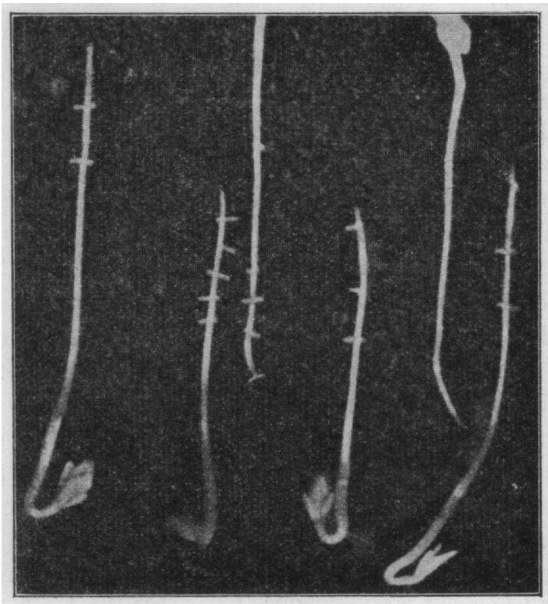


Fig. 18. Mit Zonenmarkierung versehene Wurzeln von Lepidium sativum (vgl. Vers. LW 6 Fig. 19) bei Beginn einer Rotationskrümmung.

Mit Hilfe der kinematographischen Registrierung der Winkel, in denen die Wurzeln bei verschiedener Beigabe von Reizen durch den Universalklinostaten wachsen, und Registrierung der dafür benötigten Zeiten (bis eine Kompensationslage erreicht ist), dürfte aber das Problem sehr wohl gelöst werden können.

Ein Versuch (LW 6, Fig. 18 u. 19) wurde jedoch ausgeführt, um ein vorläufiges Bild davon zu geben, wie die

Wachstumserscheinungen bei den Rotationskrümmungen verlaufen. Fig. 19 zeigt, dass

1. die Rotationskrümmung nur in den nach Beginn der Rotation noch wachsenden Zonen auftritt; die älteren Zonen (Z 1, Fig. 19) zeigen kein erneutes Wachstum mehr.
2. dass auch die konkave Seite noch wächst.

Leider sind die Lepidiumwurzeln etwas zu feine Objekte, sodass es schwer möglich ist, die Marken so aufzutragen, dass das Wachstum *beider* Seiten für sich genau gemessen werden kann. An dickeren Objekten wird man aber mit Hilfe unserer Markierungsmethode unschwer feststellen können, ob eine Rotationskrümmung auftritt durch:

1. stärkeres Wachstum der konvexen Seite, normales Wachstum der konkaven Seite, oder

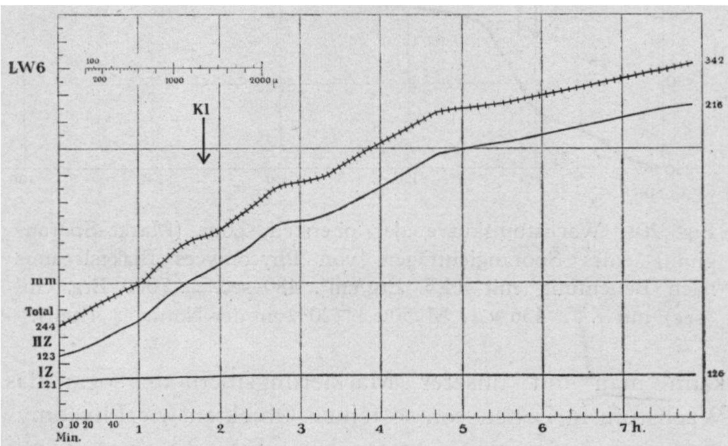


Fig. 19. Wachstum der konkaven Seite einer Wurzel von Lepidium satium vor und während des Klinostatierens, wobei Rotationskrümmung auftritt (vgl. Fig. 18) M 33 : 1 (30,3 μ in der Natur = 1mm).

2. durch normales Wachstum der konvexen Seite, verringertes Wachstum der konkaven Seite.

Fig. 19 dürfte mehr für Fall 2 sprechen, doch sei das nur unter Vorbehalt gesagt, weil noch weitere Versuche ausstehen.

D. DAS WACHSTUM DER SPORANGIENTRÄGER VON PHYCOMYCES BLAKESLEEANUS BURG. IN BESTIMMTEN ZONEN NACH BELICHTUNG MIT $\lambda = 436\ \mu\mu$.

Verzichtet man auf die Bestimmung des Wachstums zweier Seiten und beschränkt sich allgemeiner auf das Feststellen des Zonenwachstums, woraus sich, wie wir eben sahen, auch schon gewisse Rückschlüsse ziehen lassen, so

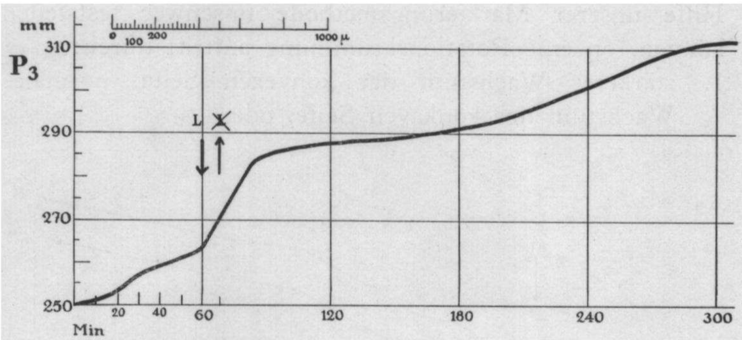


Fig. 20. Wachstumskurve der obersten Zone (Marke-Sporangium) eines Sporangienträgers von Phycomyces Blakesleeanus nach Belichtung mit 14,5 Erg/cm². 480 sec. = 7000 Erg/(cm² sec) mit $\lambda = 436\ \mu\mu$. M 50 : 1 (20 μ in der Natur = 1mm).

kann man mit unserer Markierungsmethode sogar das Wachstum in Zonen von so feinen Objekten wie Phycomyces-Sporangienträgern untersuchen. Fig. 21 zeigt 3 mit Zonenmarkierung versehene Sporangienträger von Phycomyces Blakesleeanus Burg., + Rasse, von denen die obere Zone des mittleren Sporangienträgers ausgemessen worden ist (Kurve, Fig. 20). Temperatur war 22° C.

Die Marken müssen in so einem Falle sehr fein sein und dürfen nur äusserst vorsichtig aufgesetzt werden. Am besten verfährt man

so, dass die mit sehr wenig Paraffinum liquidum purum angefeuchteten Marken mit einer feinen Spitze aus glattem, trockenem Papier an den Sporangiophor angesetzt werden und so daran gelassen werden, wie sie zufällig zu sitzen kommen, weil sich eine geringfügige Beschädigung sofort durch Krümmungen bemerkbar machen würde. Mit einiger Uebung ist aber diese Prozedur ganz gut auszuführen.

Bei Versuch P3, dessen Resultat Fig. 20 wiedergibt, wurden die Sporangienträger einseitig mit 14,5 Erg/cm^2 . 480 sec, = 7000 Erg/(cm^{2}sec), λ = 436 $\mu\mu$, belichtet. Eine Krümmung trat bei dieser Intensität zwar nicht auf, wohl

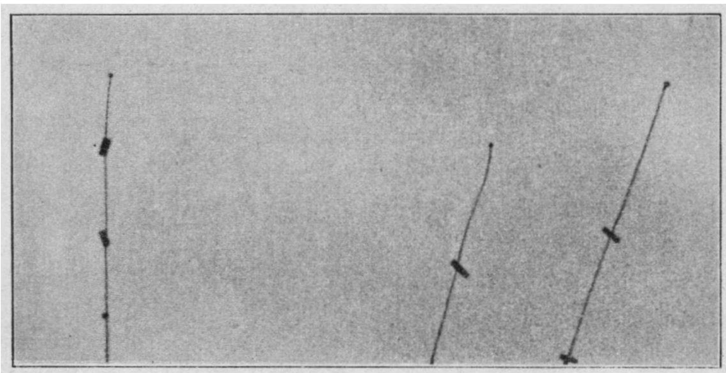


Fig. 21. Mit Zonenmarkierung versehene Sporangienträger von Phycomyces Blakesleeanus (vgl. Vers. P 3, Fig. 19).

aber eine Wachstumreaktion, die man einigermassen mit der von Blaauw (1914, S. 675) in Fig. 5 F beschriebenen Reaktionen vergleichen darf. Allerdings dauerte in unserem Versuch die Belichtung viel länger als bei Blaauw, sodass die Wachstumsbeschleunigung auch länger anhält. Etwa 10 Min. nach Ende der Belichtung sinkt das Wachstum sehr stark, hat nach weiteren ca 10 Min den früheren Dunkelwert erreicht und bleibt dann 2 Stunden lang erheblich unter diesem. Hierauf erreicht aber die Wachstumsgeschwindigkeit (ca 130 Min. nach Beginn der Belichtung) wieder den Anfangswert. Die Reaktionen bei sehr kleinen

Lichtmengen sind noch nicht mit der hier beschriebene Methode von uns untersucht worden.

7. Zusammenfassung.

1. Es wird eine Apparatur zur Herstellung und Messung von monochromatischem Licht genauer beschrieben.
   - *a.* Als Lichtquellen werden Quarz-Quecksilberlampe und Kino-Projektionslampen verwendet. Deren Licht wird durch ein System von Linsen, Spalten und Reflexionsprismen auf die Versuchspflanzen gerichtet.
   - *b.* Mit Hilfe eines Monochromators oder verschiedener Glas- und Flüssigkeitsfilter wird monochromatisches Licht erzeugt. Es werden eine Reihe Schottsche Glasfilter angegeben, die vornehmlich die Beleuchtung mit den isolierten Wellenlängen $\lambda = 366, 436, 546$ und $578\,\mu\mu$ der Hg-Lampe ermöglichen. Das den Pflanzen zugeführte Licht kann beliebig in seiner Intensität variiert werden.
   - *c.* Das auf die Pflanzen fallende Licht wird an deren Standplatz mit Hilfe einer Moll'schen Thermosäule oder einer Photozelle und einem Schleifengalvanometer in absoluten Einheiten (Erg/(cm^{2}sec) bzw. Watt/cm^2)) bei jedem Versuch gemessen.
2. Es wird eine kinematographische Registrierapparatur beschrieben, mit der das Wachstum der Versuchspflanzen gemessen wird.
   - *a.* Als Kinoapparat wird der „Universalkinamo" von Zeiss-Ikon benutzt.
   - *b.* Zum Antrieb des Kinoapparates dient der Universal-Klinostat nach Nuernbergk, der gleichzeitig das Klinostatieren der Versuchspflanzen besorgt. Bei intermittierender Rotation kann gleichzeitig photographisch registriert werden, wobei einerseits die

Periode der Registrieraufnahmen, andererseits die Zeitdauer und Winkellage der Intermittierungs-Punkte beliebig variiert werden kann. Es kann sowohl parallel als auch senkrecht zur horizontalen Klinostatenachse klinostatiert und photographisch registriert werden.

c. Eine speziell konstruierte Projektionslaterne dient zur Vergrösserung der Registrierfilme. Zu ihrer Ausmessung wird eine elektrische Zählmaschine benutzt.

3. Es werden verschiedene technische Hinweise zur Handhabung der kinematographischen Registriermethode angeführt.
   a. Die Versuchspflanzen können mit einer Zonenmarkierung aus Papier- oder Stanniolstreifchen versehen werden.
   b. Mit Hilfe panchromatischen Filmes kann auch bei sehr schwacher roter Beleuchtung registriert werden.
4. Die Vorzüge der verbesserten kinematographischen Messmethode sind folgende:
   a. Es kann das Wachstum gekrümmter Organe gemessen werden.
   b. Es kann das Wachstum einzelner Zonen gemessen werden.
   c. Es kann die Differenz des Wachstums antagonistischer Seiten bei Krümmungen bestimmt werden.
   d. Nutationen, die in der Bildfeldebene ausgeführt werden, können erkannt und eliminiert werden.
   e. Die Wachstumsmessung erfolgt automatisch in konstanten Zeitabständen und kann beliebig lang ausgedehnt werden.
   f. Das Filmprotokoll ist gleichzeitig Zeitprotokoll des Versuches.
   g. Die Genauigkeit der Messmethode beträgt unter günstigen Umständen 10 μ und noch weniger, sie

hängt vom dem Abbildungsmasstab bei der Objektphotographie ab.

5. Es werden einige experimentelle Beispiele aus der Reisphysiologie gegeben, die die Anwendung der beschriebenen Apparatur und Methoden veranschaulichen sollen.
   a. Die Reizschwelle von Avena-Koleoptilen beträgt bei schmalseitiger 3 mm Spitzenbeleuchtung für $\lambda =$ 436 $\mu\mu$ 0,42—0,5 Erg/(cm^2sec), und für $\lambda = 546\ \mu\mu$ rund 26000 Erg/(cm^2sec), folglich ist die Haferkoleoptile für $\lambda = 436\ \mu\mu$ rund 50000 mal empfindlicher als für $\lambda = 546\ \mu\mu$.
   b. Bei Dauer-Beleuchtung von Avenakoleoptilen mit 1300 Erg/cm^2sec) im Gelb ($\lambda = 578\ \mu\mu$) und mit 1300—3000 Erg/(cm^2sec) im Rot ($\lambda = \approx 610\ \mu\mu$) treten weder Krümmungen noch eigentliche Wachstumsreaktionen auf.
   c. Die Rotationskrümmungen von Lepidium-Wurzeln können kompensiert werden, wenn bei einer Klinostatenumdrehung von 1 Umdr./Min. in 12 Minuten (Richtung des Uhrzeigers) 1. 10 Drehungen, 2. je 30 Sek. Intermittierung in 0° und 180° Lage, 3. 27,5 Sek. Intermittierung in +90° Lage, 4. 32,5 Sek Intermittierung in —90° Lage (Differenz = 5 Sek.) erfolgt.
   d. Es wird die Wachstumsreaktion einer Zone eines mit 7000 Erg/(cm^2sec), $\lambda = 436\ \mu\mu$, beleuchteten Phycomyces-Sporangienträgers beschrieben.

Es ist uns eine angenehme Pflicht, am Schlusse dieser Arbeit noch denjenigen Herren und Stellen vielmals zu danken, welche unsere Bestrebungen wesentlich und massgebend gefördert haben.

In Herrn Prof. F. A. F. C. Went haben wir einen sehr wohlwollenden Förderer unserer Arbeiten gefunden, der

uns bereitwilligst alle Hilfsmittel seines Institutes zur Verfügung stellte und uns durch seinen Rat und seine wertvolle Kritik unterstützte. Herr Prof. L. S. Ornstein und Cand. phys. D. Vermeulen halfen uns sehr liebenswürdig bei den Energiemessungen. Die Herren Fr. Hartmann (Bot. Inst. München) und P. A. de Bouter (Utrecht) haben mit grösster Geschicklichkeit die Anfertigung und Zusammenstellung vieler Einzelteile ausgeführt, ohne die die Aufstellung des Ganzen unmöglich gewesen wäre, während Herr A. de Bouter mit viel Sorgfalt die in der Beschreibung enthaltenen Zeichnungen hergestellt hat. Schliesslich ist der eine von uns noch der *Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft*, welche sehr entgegenkommend alle kostbareren Instrumente als Leihgabe überlassen hat, sowie der *Rockefeller Foundation*, die ein Studienstipendium gewährte, zu grossem Danke verpflichtet.

Utrecht, Botanisch Laboratorium, im Oktober 1930.

8. Literaturverzeichnis.

Bachmann, Fr. (1929): Ueber die Verwendung von Farbfiltern für pflanzenphysiologische Forschungen./ Planta *8*, 487.

——— u. Bergann, Fr. (1930): Ueber die Wertigkeit von Strahlen verschiedener Wellenlänge für die phototropische Reizung von Avena sativa./Planta *10*, 744.

Bergann, Fr. (1930): Untersuchungen über Lichtwachstum, Lichtkrümmung und Lichtabfall bei Avena sativa mit Hilfe monochromatischen Lichtes./Planta *10*, 666.

Blaauw, A. H. (1909): Die Perzeption des Lichts./Rec. trav. bot. néerl. *5*, 209.

——— (1914): Licht und Wachstum I./ZS. f. Bot. *6*, 641.

Buder, J. (1926): Kinematographische Registrierung mit

dunkelstem Rot und kurzer Belichtung./Ber. D. Bot. Ges. *44,* (47).

Du Buy, H. G. und Nuernbergk, E. (1929, I): Ueber das Wachstum der Koleoptile und des Mesokotyls von Avena sativa unter verschiedenen Aussenbedingungen I./Proc. Kon. Akad. Wetensch. Amsterdam, *32,* 617.

——— (1929, II): Weitere Untersuchungen über den Einfluss des Lichtes auf das Wachstum von Koleoptile und Mesokotyl bei Avena sativa II./Ibidem *32,* 808.

——— (1930): Ueber das Wachstum der Koleoptile und des Mesokotyls von Avena sativa unter verschiedenen Bedingungen III./Ibidem *33,* 542.

Chwolson, O. D. (Hrsg.: G. Schmidt) (1922): Lehrbuch der Physik, Bd. II, S. 445—447. Braunschweig.

Dillewijn, C. van (1927): Die Lichtwachstumsreaktionen von Avena./Rec. trav. bot. néerl. *24,* 307.

Dorno, C. (Mit Beiträgen von K. W. Meissner u. W. Vahle) (1924): Zur Technik der Sonnenstrahlungsmessungen in einzelnen Spektralbezirken usw./Meteorol. ZS. *1924,* 234.

Dorno, C. (1926/1927): Ausstattung und Arbeitsmethoden eines modernen Strahlungsobservatoriums. Nachtrag./ Ibidem *1926,* 339. *1927,* H. 3.

Eder, J. M. (1920): Ein neues Graukeil-Photometer usw. S. 8. Halle a.d.S.

Elvegård, E., Staude, H., und Weigert, Fr. (1929): Ueber monochromatische Lichtfilter II. Zur Anwendung des Spektrodensographen von Goldberg./ZS.f. physik. Chem. *B2,* 149.

Geitel, H. (1921): Photoelektrische Messmethoden./Abderh. Handb. biol. Arbeitsmeth. Abt. II. 1, S. 1. Berlin.

Gradmann, H. (1927): Die Ueberkrümmungsbewegungen eliolierter Keimpflanzen./Jahrb. wiss. Bot. *66,* 339.

„Handbuch der Physik" (1927): Apparate und Mess-

methoden für Elektrizität und Magnetismus./Bd. *16,* S. 286 u.a. Berlin.

——— (1928): Herstellung und Messung des Lichts./ Bd. *19,* S. 430 u.a. Berlin.

Kohlrausch, F. (1927): Lehrbuch der praktischen Physik, S. 442. Leipzig.

Koningsberger, V. I. (1922): Tropismus und Wachstum./Rec. trav. bot. néerl. *19,* 5 ff.

Lange, S. (1929): Ueber den Einfluss weissen und roten Lichtes auf die Entwicklung des Mesokotyls bei Haferkeimlingen./Jahrb. wiss. Bot. *71,* 1.

Nuernbergk, E. (1927): Untersuchungen über die Lichtverteilung in Avena-Koleoptilen und anderen phototropisch reizbaren Pflanzenorganen bei einseitiger Beleuchtung./Bot. Abh. *12,* 144 ff. Jena.

——— (1929): Ein elektrischer intermittierender Klinostat usw./Ber. D. Bot. Ges. *47,* 44.

Plotnikow, J. (1930): Photochemische Arbeitsmethoden im Dienste der Biologie./Abderhaldens Handb. biol. Arbeitsmeth. Abt. III, T. A, 1. Hälfte, S. 1653. Berlin.

Shelford, V. E. (1929): Die Messung des Eindringens von Licht in Wasser mit photoelektrischen Zellen./ Ibidem, Abt. IX, T. 2, 2. Hälfte, S. 1495. Berlin.

Silberschmidt, K. (1928): Untersuchungen über die Abhängigkeit des pflanzlichen Wachstumsverlaufes usw./ Bibl. botan. H. 97, S. 18ff. Stuttgart.

Sonne, C. (1929): Weitere Mitteilungen über die Abhängigkeit lichtbiologischer Reaktionen von der Wellenlänge des Lichts./Strahlenther. *31,* 778.

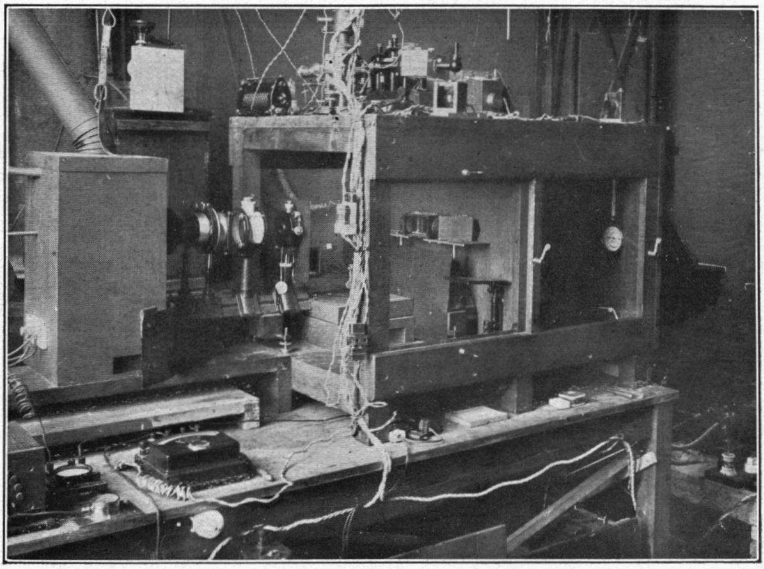
Warburg, O. (Zusammen mit E. Negelein) (1928): Ueber die katalytischen Wirkungen der lebendigen Substanz. S. 413, 444 ff. Berlin. (Siehe auch ZS.f. physik. Chem. *102,* 236. (1922) und *106,* 191. (1923).

Weigert, F. (1927): Optische Methoden der Chemie. Leipzig.

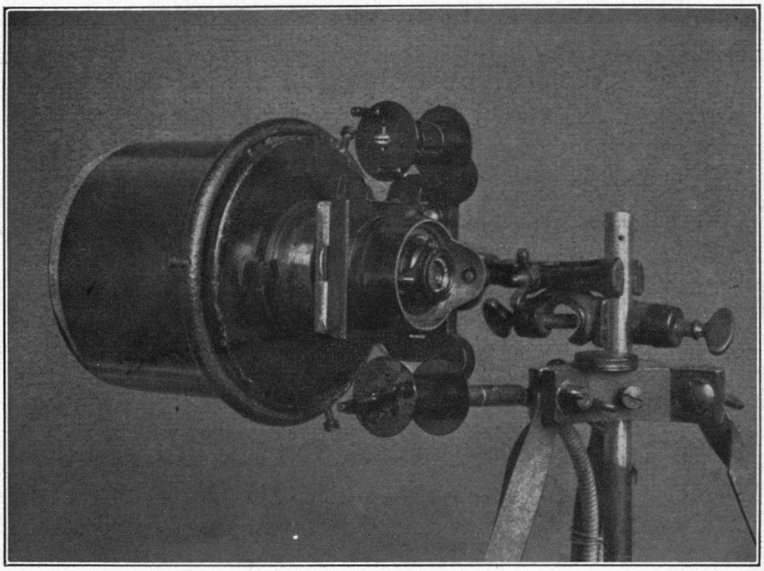
—— u. Staude, Herb. (1927): Ueber monochromatische Farbfilter./ZS.f.physik. Chem. *130,* 607.

Went, F. W. (1928): Wuchsstoff und Wachstum./Rec. trav. bot. néerl. *25,* 11.

Zimmermann, W. (1924): Ueber die längsangreifende Schwerkraft und das Sinusgesetz I u. II./Ber. D. Bot. Ges. *42,* (39).



A. Gesamtansicht der aufgestellten Apparatur.



B. Projektionslaterne zur Vergrösserung der Filmbilder.